



**TUGAS AKHIR TF141581**

**ANALISIS PENGARUH JUMLAH *FOIL*  
TERHADAP PERFORMANSI TURBIN ARUS  
AIR VERTIKAL AKSIS JENIS *HELICAL*  
DENGAN *CASCADE FOIL* BERBASIS CFD**

**ZAIN AMARTA**  
NRP. 2412 100 123

Dosen Pembimbing  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT TF141581**

**ANALYSIS OF THE NUMBER OF FOIL  
EFFECTS ON THE PERFORMANCE OF  
VERTICAL AXIS HYDROKINETIC HELICAL  
TURBINE WITH CASCADE FOIL BASED ON  
CFD**

**ZAIN AMARTA**  
**NRP. 2412 100 123**

**Supervisor**  
**Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**  
**Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.**

**DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2016**

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS PENGARUH JUMLAH *FOIL* TERHADAP PERFORMANSI TURBIN ARUS AIR VERTIKAL AKSIS JENIS *HELICAL* DENGAN *CASCADE FOIL* BERBASIS CFD

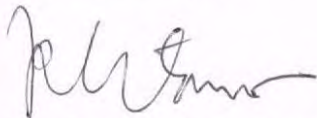
#### TUGAS AKHIR

Oleh :

**ZAIN AMARTA**  
**NRP. 2412 100 123**


Surabaya, 21 Januari 2016  
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I



**Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**  
**NIP. 19761223 200501 1 001**

Pembimbing II



**Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.**  
**NIP. 19880710 201504 2 001**

Ketua Jurusan  
Teknik Fisika FTI-ITS



**Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.**  
**NIP. 19780902 200312 1 002**

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS PENGARUH JUMLAH *FOIL* TERHADAP PERFORMANSI TURBIN ARUS AIR VERTIKAL AKSIS JENIS *HELICAL* DENGAN *CASCADE FOIL* BERBASIS CFD

#### TUGAS AKHIR

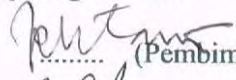
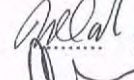
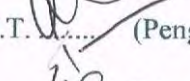
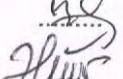
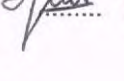
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Bidang Studi Rekayasa Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ZAIN AMARTA**  
**NRP. 2412 100 123**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  ..... (Pembimbing I)
2. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.  ..... (Pembimbing II)
3. Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.  ..... (Penguji I)
4. Lizda Johar M., S.T., M.T.  ..... (Penguji II)
5. Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T.  ..... (Penguji III)

**SURABAYA**  
**JANUARI 2016**

**ANALISIS PENGARUH JUMLAH *FOIL*  
TERHADAP PERFORMANSI TURBIN ARUS AIR  
VERTIKAL AKSIS JENIS *HELICAL* DENGAN  
*CASCADE FOIL* BERBASIS CFD**

**Nama Mahasiswa** : Zain Amarta  
**NRP** : 2412 100 123  
**Jurusan** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Pembimbing I** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
**Pembimbing II** : Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

**Abstrak**

*Performansi turbin helical dapat ditingkatkan dengan cara mengubah parameter desain turbin. Salah satu metode yang dikembangkan yaitu dengan penambahan beberapa foil dalam satu lengan turbin (cascade foil). Analisis tentang pengaruh jumlah foil terhadap performansi turbin helical dengan cascade foil dilakukan melalui simulasi numerik berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulasi dilakukan dengan variasi turbin helical (model I), turbin helical cascade 2 foil (model II), dan turbin helical cascade 3 foil (model III) pada kecepatan arus air yaitu 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, dan 2 m/s. Hasil simulasi menunjukkan turbin model III memiliki performansi terbaik dibandingkan dengan turbin model I dan II. Turbin model III mengalami peningkatan gaya dan torsi terhadap turbin model I masing-masing sebesar 37,38-100,95% dan 43,87-111,77% pada kecepatan arus air 0,5-2 m/s. Turbin model II dan model III mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan arus air pada masing-masing foil sehingga tekanan total dan kecepatan arus air total yang diterima bernilai lebih besar dibandingkan dengan turbin model I.*

**Kata kunci:** *turbin helical, cascade foil, gaya, torsi, karakteristik aliran*

**ANALYSIS OF THE NUMBER OF FOIL EFFECTS  
ON THE PERFORMANCE OF VERTICAL AXIS  
HYDROKINETIC HELICAL TURBINE WITH  
CASCADE FOIL BASED ON CFD**

**Name : Zain Amarta**  
**NRP : 2412 100 123**  
**Department : Teknik Fisika FTI-ITS**  
**Supervisor I : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**  
**Supervisor II : Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.**

***Abstract***

*The performance of helical turbine could be improved by modifying the design parameter of a turbine. One of the improvement methods is by adding some turbine foil in one arm (cascade foil). Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of the number of foil effects on the performance of helical turbine with cascade foil by numerical simulation was conducted. On this research, helical turbine (model I) was modified into helical turbine with 2 cascade foil (model II) and helical turbine with 3 cascade foil (model III). Each model was simulated on various water current velocity of 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s and 2 m/s. The simulation results showed that the turbine with model III has the best performance compared to model I and II turbine. The model III turbine produced higher output force by 37.38-100.95% and higher output torque by 43.87-111.77% compared to the model I turbine at water current velocity of 0.5-2 m/s. The model II and III turbine acquired the pressure and water current velocity distribution in each foil. Thus, the total pressure and total water current velocity received were higher than the model I turbine.*

***Keywords: helical turbine, cascade foil, force, torque, flow characteristic***

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur senantiasa terpanjatkan kepada Allah SWT Yang Maha Agung dan Maha Bijaksana. Atas berkah, petunjuk, dan karunia-Nya penulis mampu melaksanakan dan menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Jumlah *Foil* Terhadap Performansi Turbin Arus Air Vertikal Aksis Jenis *Helical* Dengan *Cascade Foil* Berbasis CFD”.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menyelesaikan tugas akhir ini, penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Mohammad Nurozie, Ibu Ida Nursanti, Adik Nur Isnainiyah Mufattikhah, dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberikan do'a, dukungan, dan perhatiannya kepada penulis.
2. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. dan Ibu Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc., selaku pembimbing tugas akhir yang senantiasa memberikan bimbingan, motivasi, dan arahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Fitri Adi Iskandariato, S.T., M.T. selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi kepada penulis.
4. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku ketua Jurusan Teknik Fisika FTI ITS.
5. Bapak Ir. Sarwono, M.M., selaku kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah mendukung kegiatan simulasi.
6. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Lizda Johar M., S.T., M.T., dan Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T., selaku penguji tugas akhir yang telah memberikan banyak masukan untuk perbaikan isi tugas akhir ini.

7. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah banyak memberikan ilmunya sehingga penulis dapat menyelesaikan jenjang kuliah hingga tugas akhir ini.
8. Mas Elfa dan Mbak Erna yang telah banyak menyempatkan waktu untuk berdiskusi tentang simulasi dan topik penelitian ini.
9. Teman-teman seperjuangan mengerjakan tugas akhir, Abdi, Ikko, Yuda, Yulia, Isna, Alvien, Riska Ayu, Anggara, Eldisa, Mas Fahmi, Mas Seno, Mas Egi, Mas Rozaq, dan Mas Restu.
10. Junivan yang telah meminjamkan komputer untuk mendukung kegiatan simulasi.
11. Teman-teman asisten dan KSE Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan atas segala bantuannya
12. Teman-teman kos Keputih 3C/2, Pak Ruri, Mas Fauzi, Rizki, Rio, Riza, Widhi, Fanis, Grovando, Arsa, Faizal, Navis, Oky, dan Hamzah.
13. Teman-teman angkatan 2012, 2013, 2014, dan 2015 lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
14. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa terdapat kekurangan dalam laporan tugas akhir ini, maka dari itu kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sangat diharapkan. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Surabaya, Januari 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SIMBOL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Energi Hidrokinetik	5
2.2 Klasifikasi Turbin Hidrokinetik	6
2.3 Profil <i>Foil</i> dalam Sistem NACA	8
2.4 Konsep Gaya <i>Lift</i> dan Gaya <i>Drag</i>	9
2.5 Daya dan Torsi Turbin	12
2.6 Turbin <i>Helical</i>	13
2.7 Karakteristik <i>Wake</i>	14
2.8 <i>Computational Fluid Dynamics</i>	16
2.9 Model Turbulensi K-Epsilon	17
BAB III METODOLOGI	19
3.1 Diagram Alir Penelitian	19
3.2 Pembuatan Geometri	21
3.3 Variasi Variabel Penelitian	24
3.3 <i>Meshing</i>	25
3.4 <i>Preprocessing</i>	27
3.5 <i>Processing</i> atau <i>Solving</i>	29
3.6 <i>Postprocessing</i>	29
3.7 Validasi Hasil Simulasi	29

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Validasi Hasil Simulasi	31
4.2 Gaya dan Torsi yang Dihasilkan Turbin	32
4.2.1 Pola resultan gaya dan torsi	32
4.2.2 Pengaruh variasi kecepatan arus air	34
4.2.3 Pengaruh variasi model turbin	36
4.3 Karakteristik Aliran yang Melalui Turbin	38
4.3.1 Karakteristik Kontur Tekanan Aliran	44
4.3.2 Karakteristik Pola Kecepatan Aliran	46
4.3.3 Karakteristik Vektor Kecepatan Aliran	48
4.4 Diskusi	51
BAB V PENUTUP	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	
BIOGRAFI PENULIS	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi turbin hidrokinetik	6
Gambar 2.2	Turbin hidrokinetik jenis HAT	7
Gambar 2.3	Turbin hidrokinetik jenis VAT	8
Gambar 2.4	Profil <i>foil</i> NACA 0012, NACA 0015, dan NACA 0018	9
Gambar 2.5	Gaya-gaya dari fluida di sekeliling sebuah benda dua dimensi (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan ( <i>lift</i> dan <i>drag</i> )	10
Gambar 2.6	Gaya tekanan dan tegangan geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan benda	10
Gambar 2.7	Gaya <i>lift</i> dan gaya <i>drag</i> pada turbin hidrokinetik jenis VAT	12
Gambar 2.8	Terjadinya <i>turbulence mixing</i> di daerah <i>downstream</i> turbin	15
Gambar 2.9	Pembentukan <i>tip vortex</i>	16
Gambar 2.10	Pembentukan <i>bound vortex</i>	16
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	19
Gambar 3.2	Skema turbin <i>helical</i>	22
Gambar 3.3	Geometri turbin <i>helical</i>	23
Gambar 3.4	Geometri domain <i>cylinder</i> sebagai tempat turbin	23
Gambar 3.5	Geometri turbin dengan domain laut dan <i>cylinder</i>	24
Gambar 3.6	Geometri turbin tampak atas dengan berbagai variasi (a) model I (b) model II (c) model III	25
Gambar 3.7	Geometri turbin tampak samping dengan berbagai variasi (a) model I (b) model II (c) model III	25
Gambar 3.8	Hasil <i>meshing</i>	26
Gambar 4.1	Pola resultan gaya yang dihasilkan turbin	33
Gambar 4.2	Pola resultan torsi yang dihasilkan turbin	33
Gambar 4.3	Peningkatan gaya yang dihasilkan turbin	35
Gambar 4.4	Peningkatan torsi yang dihasilkan turbin	36

Gambar 4.5	Prosentase peningkatan gaya yang dihasilkan turbin	37
Gambar 4.6	Prosentase peningkatan torsi yang dihasilkan turbin	38
Gambar 4.7	Kontur tekanan aliran pada turbin model I dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	39
Gambar 4.8	Kontur tekanan aliran pada turbin model II dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	40
Gambar 4.9	Kontur tekanan aliran pada turbin model III dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	40
Gambar 4.10	Pola Kecepatan aliran pada turbin model I dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	41
Gambar 4.11	Pola Kecepatan aliran pada turbin model II dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	41
Gambar 4.12	Pola Kecepatan aliran pada turbin model III dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	42
Gambar 4.13	Vektor Kecepatan aliran pada turbin model I dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	42
Gambar 4.14	Vektor Kecepatan aliran pada turbin model II dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	43
Gambar 4.15	Vektor Kecepatan aliran pada turbin model III dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas	43
Gambar 4.16	Kontur tekanan aliran pada turbin model I	44
Gambar 4.17	Kontur tekanan aliran pada turbin model II	45
Gambar 4.18	Kontur tekanan aliran pada turbin model III	46
Gambar 4.19	Pola Kecepatan aliran pada turbin model I	47
Gambar 4.20	Pola Kecepatan aliran pada turbin model II	47

Gambar 4.21	Pola Kecepatan aliran pada turbin model III	48
Gambar 4.22	Vektor Kecepatan aliran pada turbin model I	49
Gambar 4.23	Vektor Kecepatan aliran pada turbin model II	49
Gambar 4.24	Vektor Kecepatan aliran pada turbin model III	50
Gambar 4.25	Perbandingan gaya yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III	52
Gambar 4.26	Perbandingan torsi yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III	53
Gambar 4.27	Pengaruh <i>tip speed ratio</i> terhadap koefisien daya turbin	54
Gambar 4.28	Pengaruh jumlah <i>foil</i> terhadap gaya yang dihasilkan turbin	55
Gambar 4.29	Pengaruh jumlah <i>foil</i> terhadap torsi yang dihasilkan turbin	55

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Performansi Turbin <i>Darrieus</i> dan <i>Helical</i>	14
Tabel 3.1	Spesifikasi Turbin	21
Tabel 3.2	Variasi Turbin	24
Tabel 3.3	Ukuran <i>Mesh</i> Keseluruhan Domain	26
Tabel 3.4	Penentuan Inisialisasi Kondisi Batas Keseluruhan Domain	28
Tabel 4.1	Validasi Hasil Simulasi	31
Tabel 4.2	Nilai Gaya dan Torsi Tertinggi yang Dihasilkan Turbin Pada Kecepatan Arus Air 1 m/s	34

## DAFTAR SIMBOL

$E_k$	Energi kinetik [J]
$m$	Massa [kg]
$v$	Kecepatan arus air [m/s]
$\dot{m}$	Laju massa [kg/s]
$\rho$	Massa jenis [kg/m <sup>3</sup> ]
$A$	Luas penampang melintang [m <sup>2</sup> ]
$P$	Daya [W]
$F_x$	Gaya searah sumbu x [N]
$D$	Gaya <i>drag</i> [N]
$F_y$	Gaya searah sumbu y [N]
$L$	Gaya <i>lift</i> [N]
$p$	Tekanan [N/m <sup>2</sup> ]
$\tau_w$	Tegangan geser [N/m <sup>2</sup> ]
$C_D$	Koefisien <i>drag</i> [Tidak berdimensi]
$C_L$	Koefisien <i>lift</i> [Tidak berdimensi]
$C_p$	Koefisien daya [Tidak berdimensi]
$P_T$	Daya mekanik turbin [W]
$F$	Gaya <i>thrust</i> [N]
$T$	Torsi [Nm]
$R$	Jari-jari turbin [m]
$C_T$	Koefisien torsi [Tidak berdimensi]
$\lambda$	<i>Tip speed ratio</i> [Tidak berdimensi]
$\omega$	Kecepatan rotasi turbin [rad/s]
$\sigma$	<i>Solidity</i> turbin [Tidak berdimensi]
$n$	Jumlah <i>foil</i> turbin [Tidak berdimensi]
$C$	Panjang <i>chord foil</i> [m]
$D$	Diameter turbin [m]
$\varepsilon$	Laju disipasi turbulen [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$k$	Energi kinetik turbulen tiap satuan massa [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\mu$	Viskositas dinamik [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\mu_t$	Viskositas turbulen [Ns/m <sup>2</sup> ]

$\sigma_k$	Konstanta energi kinetik turbulen tiap satuan massa = 1,0 [Tidak berdimensi]
$\sigma_\varepsilon$	Konstanta Laju disipasi turbulen = 1,3 [Tidak berdimensi]
$P_k$	Produksi geser turbulen [kg/ms <sup>3</sup> ]
$P_{kb}$	Pengaruh gaya <i>buoyancy</i> terhadap energi kinetik turbulen tiap satuan massa [kg/ms <sup>3</sup> ]
$P_{\varepsilon b}$	Pengaruh gaya <i>buoyancy</i> terhadap laju disipasi turbulen [kg/ms <sup>3</sup> ]
$C_{\varepsilon 1}$	Konstanta model turbulensi k-epsilon = 1,44 [Tidak berdimensi]
$C_{\varepsilon 2}$	Konstanta model turbulensi k-epsilon = 1,92 [Tidak berdimensi]



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi hidrokinetik sebagai energi alternatif terbarukan mengalami perkembangan pesat seiring dengan peningkatan kebutuhan energi di dunia. Energi hidrokinetik bersumber dari energi arus sungai, energi arus laut, energi panas laut, energi gelombang laut, dan energi pasang surut air laut (Asmus & Wheelock, 2009). Konversi energi hidrokinetik dapat dilakukan dengan dua cara yaitu menggunakan turbin dan tanpa menggunakan turbin (Khan dkk., 2009). Turbin mengekstrak perubahan tekanan menjadi energi dengan cara mengurangi kecepatan aliran fluida sehingga terjadi penurunan momentum linier dari air. Sesuai dengan hukum kekekalan momentum, besarnya gaya sama dengan laju penurunan momentum. Semakin banyak penurunan momentum maka semakin besar gaya yang dihasilkan (Twidell & Weir, 2006).

Turbin hidrokinetik secara umum dibedakan menjadi dua jenis yaitu *Horizontal Axis Turbine* (HAT) dan *Vertical Axis Turbine* (VAT). Turbin hidrokinetik jenis VAT memiliki kelebihan dapat berotasi pada kecepatan arus air yang rendah dan dapat menerima arus air dari segala arah sehingga sangat cocok diterapkan di sungai dan laut (Khan dkk., 2009). Pengembangan turbin hidrokinetik jenis VAT bertujuan untuk meningkatkan performansi turbin. Semakin tinggi performansi turbin maka semakin banyak ekstraksi energi yang dihasilkan. Peningkatan performansi turbin dapat dilakukan dengan cara meningkatkan kecepatan arus air yang melalui turbin seperti penggunaan selubung (*diffuser*) dan mengubah parameter desain turbin seperti profil *foil*, jumlah *foil*, dimensi turbin, dan *solidity* turbin.

Turbin *darrieus* dan *helical* merupakan turbin hidrokinetik jenis VAT yang banyak dikembangkan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, turbin *helical* memiliki performansi yang lebih baik daripada turbin *darrieus*. Turbin *helical* memiliki torsi yang stabil pada berbagai kecepatan arus air dan dapat berotasi

pada kecepatan arus air yang rendah (Gorlov, 1998). Turbin *helical* juga memiliki efisiensi tertinggi dibandingkan dengan turbin hidrokinetik jenis VAT yang lain (Gorban dkk., 2001).

Samaraweera dkk. (2010) melakukan penelitian tentang pengaruh jumlah *foil* pada turbin. Pada penelitian tersebut dilakukan pemodelan turbin dengan variasi jumlah *foil* yang digunakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin dengan tiga *foil* memiliki efisiensi tertinggi. Li dan Calisal (2010) melakukan penelitian tentang dimensi turbin. Pada penelitian tersebut dilakukan pemodelan turbin dengan variasi dimensi turbin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin mengalami peningkatan efisiensi terbaik pada dimensi dengan rasio tinggi dan jari-jari turbin sebesar 2 hingga 4.

Penelitian lain menunjukkan bahwa turbin *helical* dapat ditingkatkan performansinya dengan memvariasikan *solidity*. Efisiensi tertinggi turbin *helical* didapatkan pada *solidity* 0,55 (Wright & Hansen, 2011). Selain itu performansi turbin *helical* juga dapat ditingkatkan melalui sudut inklinasi *foil*. Turbin *helical* memiliki efisiensi tertinggi pada sudut inklinasi  $66,4^\circ$  (Han dkk., 2013). Penelitian tentang simulasi turbin *helical* dilakukan untuk mengetahui fluktuasi gaya dan torsi yang dihasilkan turbin dengan variasi sudut inklinasi dan sudut serang *foil*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin *helical* dengan sudut inklinasi  $60^\circ$  dan sudut serang  $0^\circ$  memiliki fluktuasi gaya dan torsi yang rendah sehingga tidak memperbesar getaran yang dihasilkan turbin (Marsh dkk., 2015).

Metode lain yang dapat digunakan untuk meningkatkan performansi turbin *helical* yaitu menambahkan beberapa *foil* dalam satu lengan turbin dengan luas sapuan yang sama sehingga tidak memperbesar dimensi turbin. Penambahan beberapa *foil* dalam satu lengan turbin disebut dengan *cascade foil*. Berdasarkan parameter-parameter desain turbin *helical* yang memiliki performansi terbaik, maka pada penelitian ini dilakukan analisis tentang pengaruh jumlah *foil* terhadap performansi turbin *helical* dengan *cascade foil* melalui simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh jumlah *foil* terhadap performansi turbin *helical* dengan *cascade foil*?
- Bagaimana karakteristik aliran yang melalui turbin *helical* dengan *cascade foil*?

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui pengaruh jumlah *foil* terhadap performansi turbin *helical* dengan *cascade foil*.
- Mengetahui karakteristik aliran yang melalui turbin *helical* dengan *cascade foil*.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Jenis turbin yang digunakan adalah turbin arus air vertikal aksis jenis *helical*.
- Tipe *foil* yang digunakan adalah NACA 0018 dengan panjang *chord* 10 cm.
- Menggunakan tiga variasi turbin yaitu turbin *helical* (model I), turbin *helical cascade 2 foil* (model II), dan turbin *helical cascade 3 foil* (model III).
- Simulasi dilakukan pada kecepatan arus air 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, dan 2 m/s.
- Simulasi dilakukan dengan menggunakan *computational fluid dynamics* tiga dimensi.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Energi Hidrokinetik

Pemanfaatan energi hidrokinetik sebagai energi alternatif terbarukan mengalami perkembangan pesat seiring dengan peningkatan kebutuhan energi di dunia. Energi hidrokinetik bersumber dari energi arus sungai, energi arus laut, energi panas laut, energi gelombang laut, dan energi pasang surut air laut (Asmus & Wheelock, 2009).

Konversi energi hidrokinetik dapat dilakukan dengan dua cara yaitu menggunakan turbin dan tanpa menggunakan turbin. Konversi menggunakan turbin antara lain dengan *Horizontal Axis Turbine* (HAT), *Vertical Axis Turbine* (VAT), *cross-flow turbine*, *venture*, dan *gravitational vortex*. Sedangkan konversi tanpa menggunakan turbin antara lain dengan *flutter vane*, *piezoelectric*, *vortex induced vibration*, *oscillating hydrofoil*, dan *sails* (Khan dkk., 2009).

Konversi energi hidrokinetik menjadi energi listrik menggunakan turbin dipengaruhi oleh massa jenis fluida yang mengalir, luas sapuan yang mengenai turbin, dan kecepatan arus air yang melalui turbin (Twidell & Weir, 2006). Energi kinetik air dengan massa  $m$  yang bergerak dengan kecepatan arus air  $v$  dirumuskan sebagai berikut:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.1)$$

Sedangkan laju massa dengan massa jenis air  $\rho$  yang bergerak dengan kecepatan arus air  $v$  dan luas penampang melintang  $A$  dirumuskan sebagai berikut:

$$\dot{m} = \rho A v \quad (2.2)$$

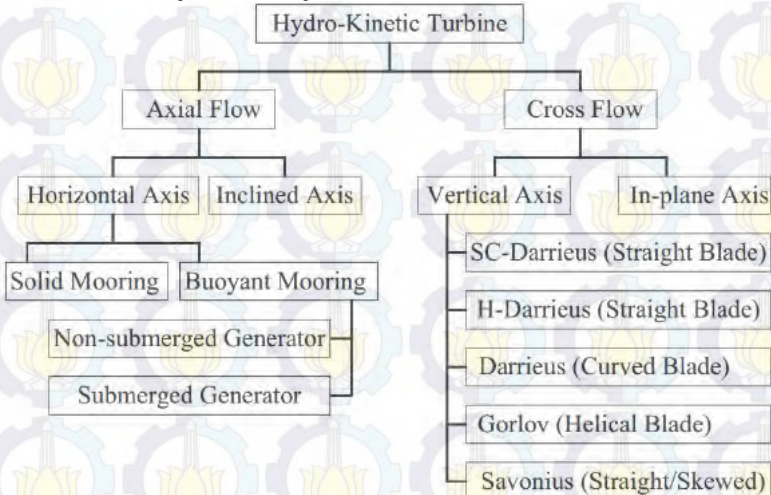
Sehingga daya yang merupakan energi air dengan massa  $m$  yang bergerak dengan kecepatan arus air  $v$  tiap satuan waktu  $t$  dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.3)$$

## 2.2 Klasifikasi Turbin Hidrokinetik

Turbin hidrokinetik merupakan salah satu jenis teknologi untuk mengkonversi energi air menjadi energi listrik. Teknologi ini banyak dikembangkan karena memanfaatkan energi hidrokinetik yang merupakan energi alternatif terbarukan. Turbin mengekstrak perubahan tekanan menjadi energi dengan cara mengurangi kecepatan aliran fluida sehingga terjadi penurunan momentum linier dari air. Sesuai dengan hukum kekekalan momentum, besarnya gaya sama dengan laju penurunan momentum. Semakin banyak penurunan momentum maka semakin besar gaya yang dihasilkan (Twidell & Weir, 2006).

Turbin hidrokinetik secara umum dibedakan menjadi dua jenis yaitu *Horizontal Axis Turbine* (HAT) dan *Vertical Axis Turbine* (VAT). Turbin hidrokinetik jenis HAT memiliki sumbu rotasi yang searah dengan arah datangnya fluida. Sedangkan turbin hidrokinetik jenis VAT memiliki sumbu rotasi yang tegak lurus dengan arah datangnya fluida (Khan dkk., 2009). Klasifikasi turbin hidrokinetik dapat dilihat pada Gambar 2.1.

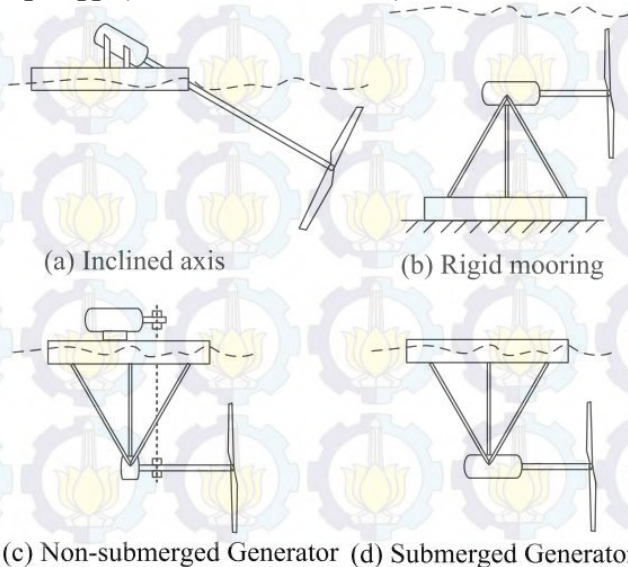


**Gambar 2.1** Klasifikasi turbin hidrokinetik (Khan dkk., 2009)

Setiap jenis turbin hidrokinetik memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin hidrokinetik jenis HAT antara lain

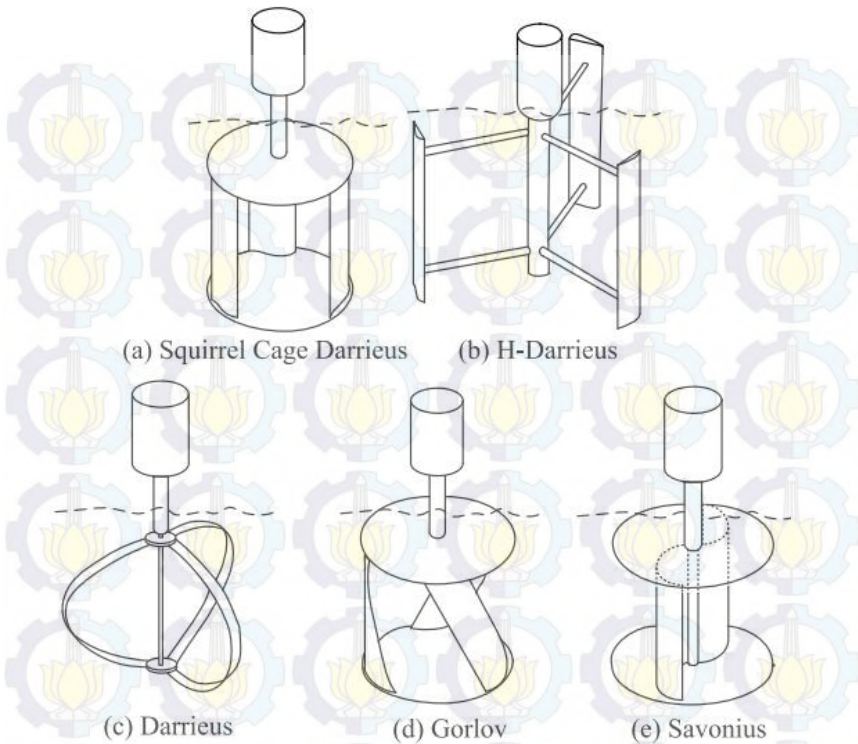
kemampuan *self starting* yang tinggi, efisiensi yang lebih tinggi, dan rasio biaya terhadap daya yang dihasilkan lebih rendah. Sedangkan kekurangan turbin hidrokinetik jenis HAT antara lain mengharuskan pemasangan generator dan *gearbox* dekat dengan rotor sehingga membuat perawatan lebih sulit dan memerlukan bagian tambahan seperti ekor yang digunakan untuk mengarahkan turbin saat arah aliran fluida berubah (Zobaa & Bansal, 2011).

Kelebihan turbin hidrokinetik jenis VAT antara lain kemudahan dalam perawatan karena pemasangan generator dan *gearbox* dapat diletakkan jauh dengan rotor, dapat menerima aliran fluida dari segala arah, dapat beroperasi pada kecepatan aliran fluida yang rendah, dan desain *foil* yang sederhana sehingga biaya pembuatan *foil* lebih rendah. Sedangkan kekurangan turbin hidrokinetik jenis VAT antara lain kemampuan *self starting* yang rendah sehingga dapat mengakibatkan patahnya *foil* dan menghasilkan getaran akibat rotasi turbin. Selain itu juga memiliki efisiensi yang rendah serta sulit dalam mengendalikan kecepatan *foil* yang tinggi (Zobaa & Bansal, 2011).



**Gambar 2.2** Turbin hidrokinetik jenis HAT (Khan dkk., 2009)





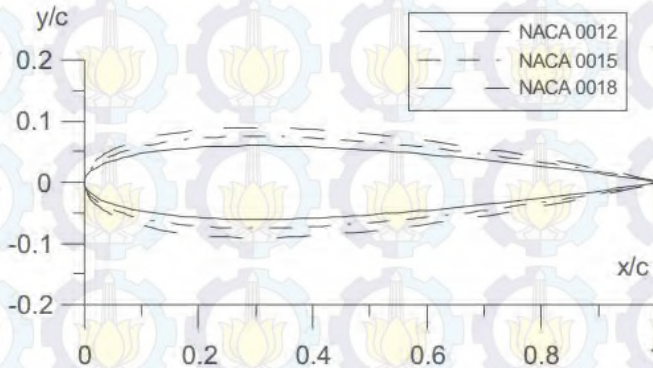
**Gambar 2.3** Turbin hidrokinetik jenis VAT (Khan dkk., 2009)

### 2.3 Profil *Foil* dalam Sistem NACA

NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) adalah suatu badan atau lembaga bidang aeronautika yang menangani tentang profil *foil*. Profil *foil* dalam sistem NACA didefinisikan dalam seri empat digit. Digit pertama menunjukkan besar maksimum *chamber* sebagai prosentase dari panjang *chord*. Digit kedua menunjukkan jarak maksimum *chamber* terhadap panjang *chord* dari *leading edge* sebagai prosentase dari panjang *chord*. Dua digit terakhir menunjukkan besar maksimum ketebalan *foil* sebagai prosentase dari panjang *chord*. Jarak maksimum ketebalan *foil* dari *leading edge* sebesar 30% dari panjang *chord*.



Apabila dua digit pertama profil *foil* bernilai 0 maka *foil* tersebut berbentuk simetris. Pada penelitian ini tipe *foil* yang digunakan adalah NACA 0018 yang artinya profil *foil* berbentuk simetris. NACA 0018 memiliki rasio gaya *lift* dan gaya *drag* yang baik (Coiro dkk., 2005). Perbandingan profil *foil* NACA 0018 dengan tipe lainnya dapat dilihat pada Gambar 2.4.



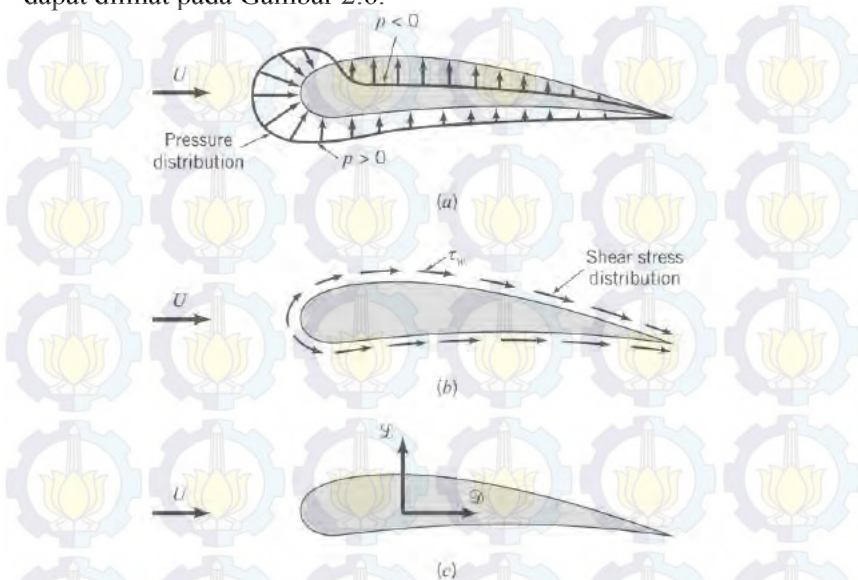
**Gambar 2.4** Profil *foil* NACA 0012, NACA 0015, dan NACA 0018 (Coiro dkk., 2005)

## 2.4 Konsep Gaya *Lift* dan Gaya *Drag*

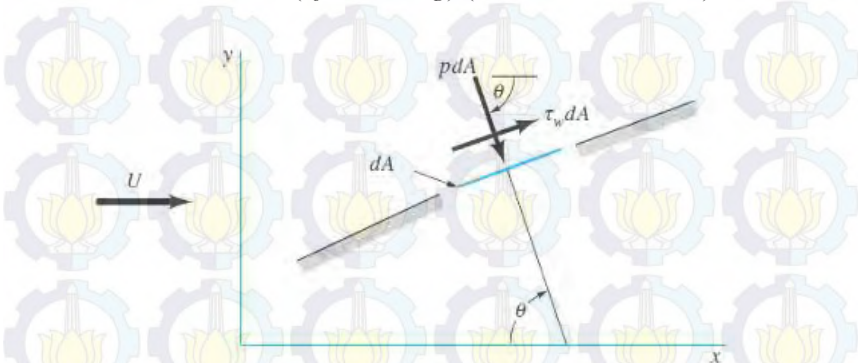
Apabila sebuah benda bergerak melalui sebuah fluida maka akan terjadi interaksi antara benda dengan fluida tersebut. Fenomena tersebut dapat digambarkan melalui bentuk gaya-gaya pada permukaan fluida dengan benda yang disebabkan oleh tegangan normal akibat tekanan  $p$  dan tegangan geser dinding  $\tau_w$ , akibat viskos (Munson dkk., 2002). Gaya-gaya dari fluida di sekeliling sebuah benda dua dimensi dapat dilihat pada Gambar 2.5.

Gaya resultan dengan arah yang sejajar dengan kecepatan fluida disebut gaya seret (*drag*)  $D$  dan gaya resultan dengan arah yang tegak lurus dengan kecepatan fluida disebut gaya angkat (*lift*)  $L$ . Nilai resultan dari tekanan dan tegangan geser dapat diperoleh dengan mengintegrasikan pengaruh-pengaruh dari kedua besaran tersebut (Munson dkk., 2002). Untuk mengetahui gaya tekanan dan

tegangan geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan benda dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.5** Gaya-gaya dari fluida di sekeliling sebuah benda dua dimensi (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (*lift* dan *drag*) (Munson dkk., 2002)



**Gambar 2.6** Gaya tekanan dan tegangan geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan benda (Munson dkk., 2002)

Komponen  $x$  dan  $y$  dari gaya fluida pada sebuah elemen kecil  $dA$  dari permukaan benda dirumuskan sebagai berikut:

$$dF_x = (p \, dA) \cos\theta + (\tau_w \, dA) \sin\theta \quad (2.4)$$

$$D = \int dF_x = \int p \cos\theta \, dA + \int \tau_w \sin\theta \, dA \quad (2.5)$$

$$dF_y = -(p \, dA) \sin\theta + (\tau_w \, dA) \cos\theta \quad (2.6)$$

$$L = \int dF_y = -\int p \sin\theta \, dA + \int \tau_w \cos\theta \, dA \quad (2.7)$$

Untuk melakukan pengintegrasian dan menentukan gaya seret dan gaya angkat maka harus diketahui bentuk benda (yaitu  $\theta$  sebagai fungsi dari lokasi di sepanjang benda) dan distribusi tekanan dan tegangan geser di sepanjang permukaan benda. Nilai dari distribusi tekanan dapat diperoleh secara eksperimental dengan menggunakan rangkaian tiap tekanan statik sepanjang permukaan benda sedangkan nilai dari tegangan geser sulit ditentukan. Tanpa mengetahui nilai dari distribusi tekanan dan tegangan geser maka nilai gaya seret dan gaya angkat tidak dapat ditentukan.

Cara lain yang dapat digunakan adalah dengan mendefinisikan koefisien gaya seret dan gaya angkat yang tidak berdimensi dan menentukan nilai perkiraan dengan menggunakan analisis yang disederhanakan, teknik numerik, atau eksperimen yang sesuai. Koefisien gaya seret  $C_D$  dan gaya angkat  $C_L$  dengan fluida yang mempunyai massa jenis  $\rho$ , luas sapuan melintang  $A$  dan bergerak dengan kecepatan arus air  $v$  dirumuskan sebagai berikut:

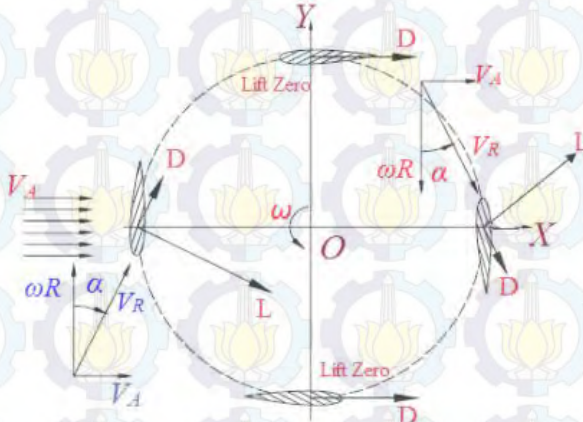
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (2.8)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (2.9)$$

Pada turbin turbin hidrokinetik jenis VAT, gaya angkat yang dihasilkan turbin dikarenakan bentuk *foil* yang berfungsi



memotong aliran fluida dengan sudut serang tertentu sehingga mengakibatkan perbedaan tekanan. Perbedaan tekanan tersebut akan mengakibatkan terjadinya gaya angkat yang menyebabkan *foil* bergerak ke depan. Torsi yang dihasilkan oleh gaya angkat yang digunakan untuk mendorong gerakan turbin harus lebih besar dari torsi yang dihasilkan oleh gaya seret (Khalid dkk., 2012).



**Gambar 2.7** Gaya *lift* dan gaya *drag* pada turbin hidrokinetik jenis VAT (Khalid dkk., 2012)

## 2.5 Daya dan Torsi Turbin

Daya sebuah turbin pada keadaan sebenarnya lebih kecil dibandingkan daya dari aliran air yang melewati rotor turbin. Hal tersebut dikarenakan sebagian energi kinetik dari aliran air ditransfer ke rotor dan sisanya meninggalkan rotor. Besarnya energi air yang dapat diekstrak menjadi energi mekanik yang melewati rotor dianggap sebagai efisiensi atau koefisien daya ( $C_p$ ). Koefisien daya sebuah turbin dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti profil *foil* rotor, susunan *foil*, pengaturan *foil*, dan lain-lain. Koefisien daya yang melewati rotor merupakan perbandingan antara daya keluaran yang dihasilkan rotor dengan daya aliran air yang secara teoritis dirumuskan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho A v^3} \quad (2.10)$$

Torsi sebuah rotor turbin pada kenyataannya lebih kecil dibandingkan dengan nilai teoritis. Untuk mencari nilai torsi rotor dibutuhkan gaya *thrust* rotor yang dirumuskan sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (2.11)$$

Sehingga torsi rotor yang mempunyai jari jari  $R$  secara teoritis dirumuskan sebagai berikut:

$$T = \frac{1}{2} \rho A v^2 R \quad (2.12)$$

Koefisien torsi ( $C_T$ ) yang merupakan perbandingan antara torsi aktual dengan torsi teoritis dirumuskan sebagai berikut:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A v^2 R} \quad (2.13)$$

Untuk menentukan efisiensi interkasi antara kecepatan rotasi rotor dengan kecepatan aliran air dapat dijelaskan melalui *tip speed ratio* (TSR). TSR dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.14)$$

TSR juga merupakan perbandingan antara koefisien daya dengan koefisien torsi yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{C_p}{C_T} = \frac{\omega R}{v} = \lambda \quad (2.15)$$

*Solidity* merupakan tingkat kepadatan turbin (Jing dkk., 2014). Untuk menentukan nilai *solidity* turbin dengan *foil* yang berjumlah  $n$ , panjang *chord foil*  $C$ , dan diameter turbin  $D$  dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{nC}{\pi D} \quad (2.16)$$

## 2.6 Turbin Helical

Turbin *darrieus* dan *helical* merupakan turbin hidrokinetik jenis VAT yang banyak dikembangkan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, turbin *helical* memiliki performansi yang lebih baik daripada turbin *darrieus*. Turbin *helical* memiliki torsi

yang stabil pada berbagai kecepatan arus air dan dapat berotasi pada kecepatan arus air yang rendah (Gorlov, 1998). Turbin *helical* juga memiliki efisiensi tertinggi dibandingkan dengan turbin hidrokinetik jenis VAT yang lain (Gorban dkk., 2001). Perbandingan performansi turbin *darrieus* dan *helical* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Perbandingan Performansi Turbin *Darrieus* dan *Helical* (Tsai & Chen, 2014)

Parameter	Turbin <i>Darrieus</i>	Turbin <i>Helical</i>
Gaya	659,71 N	646,67 N
Torsi	15,78 Nm	40,05 Nm
Daya	116,34 Watt	146,76 Watt
Efisiensi	23,5%	35%

## 2.7 Karakteristik Wake

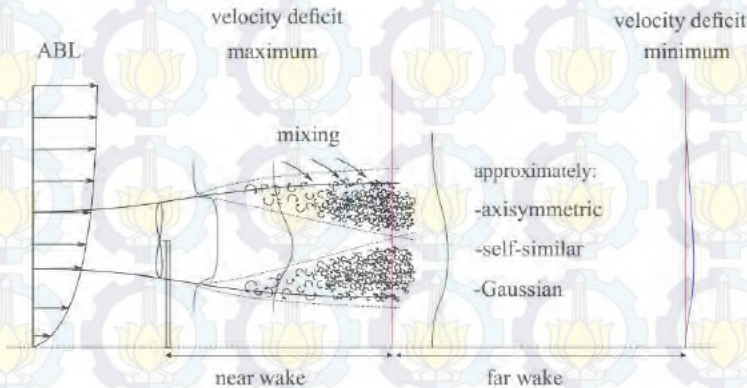
*Wake* merupakan fenomena pusaran aliran yang terjadi ketika turbin berotasi. Fenomena ini terjadi akibat ekstraksi energi yang dilakukan oleh turbin dengan cara mengurangi kecepatan aliran fluida sehingga terjadi penurunan energi dan momentum linier dari air (Twidell & Weir, 2006). Karakteristik *wake* tersusun dari interaksi *vortex* yang sangat kompleks. Selain itu juga terjadi *turbulence mixing* antara aliran *downstream* yang memiliki kecepatan rendah dengan aliran *freestream* yang memiliki kecepatan tinggi. Hal tersebut menyebabkan terjadinya pertukaran energi dan momentum dari aliran *freestream* menuju aliran *downstream* atau aliran yang sudah terpengaruh oleh *wake* (Bartl, 2011).

Terjadinya *turbulence mixing* di daerah *downstream* turbin dapat dilihat pada Gambar 2.8. Pada titik tertentu, aliran fluida di sekeliling turbin dapat mencapai titik tengah *wake* yang menandai berakhirnya daerah *near wake*. Setelah daerah transisi ini, semua aliran *wake* akan berkembang. Daerah ini disebut dengan daerah *far wake* (Bartl, 2011).

*Vortex* adalah massa fluida yang partikel-partikelnya bergerak berputar dengan garis arus (*streamline*) membentuk lingkaran



konsentris. Gerakan *vortex* berputar disebabkan karena perbedaan kecepatan fluida antar lapisan yang berdekatan (Sunu, 2008). Terjadinya *vortex* dapat diamati melalui sebuah benda yang berbentuk aerodinamis seperti *foil* turbin. Apabila *foil* turbin bergerak melalui sebuah fluida maka akan terjadi interaksi antara *foil* tersebut dengan fluida (Munson dkk., 2002).

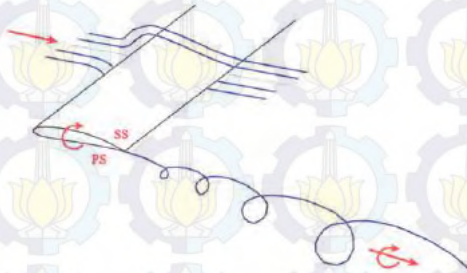


**Gambar 2.8** Terjadinya *turbulence mixing* di daerah *downstream* turbin (Sanderse, 2009)

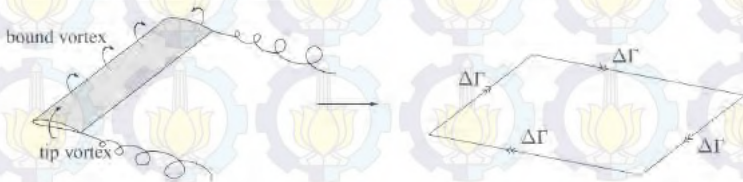
Interaksi yang terjadi berupa perbedaan tekanan antara bagian atas *foil* (SS) dan bagian bawah *foil* (PS) sehingga mengakibatkan gaya *lift*. Karena perbedaan tekanan ini, terdapat fluida yang mengalir dari bagian bawah *foil* menuju bagian atas *foil* melalui ujung *foil*. Aliran fluida sekunder tersebut akan bercampur dengan aliran fluida utama di sekeliling *foil* sehingga menyebabkan *vortex* di ujung *foil* yang disebut dengan *tip vortex*. Pembentukan *tip vortex* dapat dilihat pada Gambar 2.9. Karakteristik dari *tip vortex* adalah kecepatan fluida yang tinggi dan tekanan yang rendah sehingga mengakibatkan rugi aerodinamis yang cukup besar (Bartl, 2011).

Seperti pada bagian *tip*, aliran fluida sekunder akibat perbedaan tekanan juga terjadi pada bagian *root*. Ketika aliran fluida sekunder ini bercampur dengan aliran fluida utama, maka akan terbentuk *root vortex*. Karena kecepatan fluida pada bagian *root* lebih kecil dibandingkan dengan bagian *tip*, maka rugi

aerodinamis akibat *root vortex* lebih kecil daripada *tip vortex*. Selain *tip vortex* dan *root vortex*, terdapat *bound vortex* yang terjadi pada *foil* turbin. *Bound vortex* terjadi akibat perubahan kecepatan fluida yang mendadak pada *foil* dan perbedaan tekanan sehingga menghasilkan gaya *lift* (Sanderse, 2009). Pembentukan *bound vortex* dapat dilihat pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.9** Pembentukan *tip vortex* (Bartl, 2011)



**Gambar 2.10** Pembentukan *bound vortex* (Sanderse, 2009)

## 2.8 Computational Fluid Dynamics

Komputasi dinamika fluida atau *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan suatu metode komputasi yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisis aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena-fenomena lain dengan menyelesaikan persamaan matematika (Anderson, 2005).

Simulasi berbasis CFD telah dikembangkan mulai tahun 1960an pada industri luar angkasa. Namun saat ini simulasi CFD telah digunakan secara luas pada industri manufaktur hingga industri kimia. Keuntungan menggunakan CFD dalam analisis adalah *insight* (pemahaman mendalam), *foresight* (prediksi



menyeluruh), dan *efficiency* (efisiensi waktu dan biaya) (Anderson, 2005). Aspek fisik dari aliran dinamik fluida didasarkan pada prinsip hukum kekekalan massa, momentum, dan energi. Pada umumnya terdapat tiga tahapan untuk melakukan proses simulasi CFD antara lain sebagai berikut:

- *Preprocessing*  
*Preprocessing* merupakan tahap awal untuk membangun dan menganalisis sebuah model CFD yaitu dengan melakukan penggambaran geometri model, membuat *mesh* untuk membagi daerah komputasi menjadi sejumlah grid yang sesuai, menentukan parameter fisis dari kondisi batas model dan sifat-sifat fluidanya.
- *Processing* atau *solving*  
*Solving* merupakan tahap untuk menghitung kondisi-kondisi yang telah ditentukan pada saat *preprocessing*. Pada proses *solving*, perhitungan dilakukan dengan cara pendekatan numerik seperti elemen hingga, beda hingga, serta volume hingga. Pada proses *solving* akan dilakukan iterasi hingga semua data yang dimasukkan dapat terhitung dan mencapai kondisi konvergen.
- *Postprocessing*  
*Postprocessing* merupakan tahap terakhir dalam simulasi CFD yaitu mengorganisasi dan menginterpretasikan data hasil simulasi CFD yang berupa kontur gambar, plot grafik, dan animasi. Visualisasi yang dapat ditampilkan adalah kontur (*contour*) yang merupakan pola dari nilai parameter fisis yang disimulasikan seperti kontur kecepatan, tekanan, dan *vorticity*. Kemudian vektor (*vector*) yang merupakan arah dari besaran seperti vektor kecepatan. Lalu terdapat pola aliran (*streamline*) yang merupakan pergerakan kontinyu fluida yang bergerak sepanjang ruang. Serta terdapat *particle track* yang merupakan lintasan partikel hasil diskritisasi.

## 2.9 Model Turbulensi K-Epsilon

Aliran pada region turbulen memiliki karakteristik kecepatan yang berfluktuasi. Fluktuasi kecepatan tersebut menyebabkan

berbagai variabel seperti konsentrasi partikel, momentum, dan energi juga ikut berfluktuasi. Oleh karena itu dibutuhkan suatu pendekatan matematis atau pemodelan untuk menyelesaikan permasalahan aliran pada region turbulen. Salah satu model turbulensi yang terdapat dalam simulasi berbasis CFD adalah model turbulensi k-epsilon (Tuakia, 2008).

Model turbulensi k-epsilon merupakan model semi empiris yang dikembangkan oleh Launder dan Spalding. Model turbulensi k-epsilon merupakan model yang menyelesaikan dua persamaan yaitu persamaan energi kinetik turbulen dan persamaan laju disipasi turbulen. Model turbulensi k-epsilon memberikan keuntungan berupa efisiensi sumber daya komputasi serta kestabilan perhitungan numerik dan akurasi yang dihasilkan (Tuakia, 2008). Persamaan energi kinetik turbulen dalam model turbulensi k-epsilon dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (2.17)$$

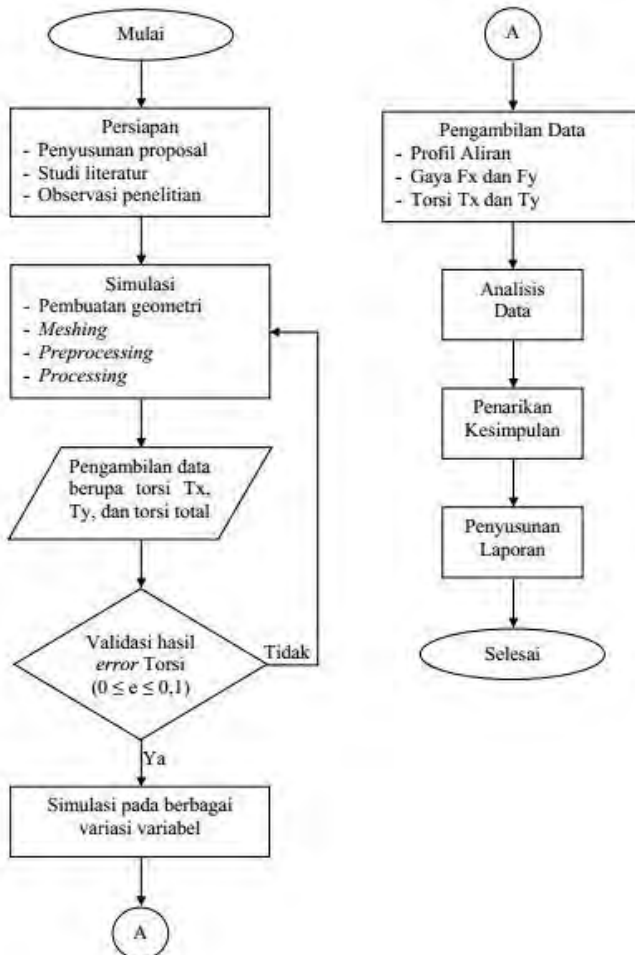
Sedangkan laju disipasi turbulen dalam model turbulensi k-epsilon dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (2.18)$$

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir yang menunjukkan tahapan-tahapan pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

Pelaksanaan penelitian dimulai dengan tahap persiapan. Tahap persiapan meliputi penyusunan proposal, studi literatur, dan observasi penelitian. Penyusunan proposal bertujuan untuk memaparkan topik penelitian yang akan dilakukan beserta jadwal pelaksanaannya. Kemudian studi literatur bertujuan untuk mengetahui referensi penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya beserta teori-teori penunjang yang berkaitan. Referensi yang digunakan merujuk pada berbagai sumber antara lain jurnal, buku, makalah, laporan, dan informasi tambahan lainnya. Referensi yang digunakan berkaitan dengan energi hidrokinetik, klasifikasi turbin hidrokinetik, profil *foil* dalam sistem NACA, konsep gaya *lift* dan gaya *drag*, daya dan torsi turbin, turbin *helical*, karakteristik *wake*, *computational fluid dynamics*, dan model turbulensi k-epsilon. Sedangkan observasi penelitian bertujuan untuk mengumpulkan data-data hasil eksperimen.

Selanjutnya pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan menggunakan *computational fluid dynamics*. Tahap simulasi awal meliputi pembuatan geometri, *meshing*, *preprocessing*, *processing*, dan *postprocessing*. Simulasi awal bertujuan untuk memvalidasi hasil simulasi. Validasi merupakan tahapan untuk mengetahui kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya. Validasi hasil simulasi dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dari hasil eksperimen dengan kondisi turbin diletakkan pada kanal terbuka. Validasi dilakukan dengan meninjau ukuran *mesh* dan kondisi batas serta membandingkan nilai torsi resultan yang dihasilkan turbin *helical*, turbin *helical cascade 2 foil*, dan turbin *helical cascade 3 foil*. Nilai torsi resultan yang divalidasikan adalah torsi resultan yang dihasilkan pada sudut azimuth 180 derajat dengan kondisi kecepatan arus air 1,142 m/s. Apabila *error* torsi yang dihasilkan bernilai lebih kecil dari 10% maka ukuran *mesh* dan kondisi batas dianggap telah sesuai dan mendekati kondisi sebenarnya (Petri dkk., 2015).

Setelah didapatkan kondisi yang valid maka tahap selanjutnya adalah simulasi pada berbagai variasi variabel. Variabel yang divariasikan antara lain jumlah *foil* dalam satu lengan turbin dan

kecepatan arus air. Apabila simulasi telah selesai maka dilakukan pengambilan data berupa torsi dan gaya serta karakteristik aliran yang melalui turbin seperti kontur tekanan aliran, pola kecepatan aliran, dan vektor kecepatan aliran. Data yang diperoleh tersebut kemudian dianalisis sesuai dengan tujuan penelitian. Setelah dianalisis maka tahap selanjutnya dilakukan penarikan kesimpulan serta penyusunan laporan.

### 3.2 Pembuatan Geometri

Turbin yang digunakan dalam penelitian ini adalah turbin arus air vertikal aksis jenis *helical*. Terdapat 4 domain dalam geometri turbin antara lain *foil 1*, *foil 2*, *foil 3*, dan *shaft*. Tipe *foil* yang digunakan adalah NACA 0018. Spesifikasi turbin dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

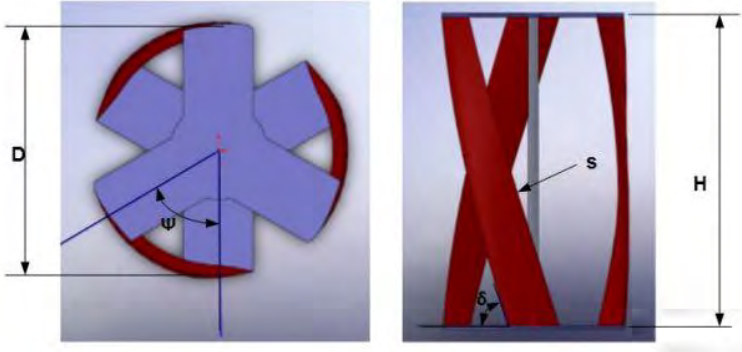
**Tabel 3.1** Spesifikasi Turbin

No	Besaran	Nilai
1	Diameter Turbin	80 cm
2	Tinggi Turbin	80 cm
3	Panjang <i>Chord Foil</i>	10 cm
4	Diameter <i>Shaft</i>	3,19 cm
5	Panjang <i>Shaft</i>	80 cm

Tahap pertama dalam pembuatan geometri turbin adalah membuat *foil*. Pembuatan *foil* dimulai dengan membuat titik (*point*) sesuai dengan tipe NACA 0018. Titik tersebut di-*import* dari *file* format .txt yang berisi koordinat NACA 0018. Kemudian titik koordinat tersebut dihubungkan sehingga membentuk garis (*line*). Garis yang terhubung tersebut dijadikan sebuah permukaan (*surface*) kemudian dibuat menjadi sebuah benda (*body*) berbentuk *foil*.

*Foil* pada turbin *helical* memiliki sudut inklinasi tertentu, sehingga dalam pembuatan *body foil* diperlukan pembagian *foil* menjadi beberapa segmen. Segmen-segmen tersebut berupa *surface* yang digandakan dengan sudut fase tertentu sesuai dengan persamaan (3.1). Pembuatan *foil* dalam penelitian ini terbagi

menjadi 20 segmen. Hal ini bertujuan agar *foil* yang terbentuk menjadi halus (*smooth*). *Foil* yang terbentuk selanjutnya digandakan dengan jarak sudut 120 derajat dan 240 derajat. Untuk mengetahui skema turbin *helical* dapat dilihat pada Gambar 3.2.



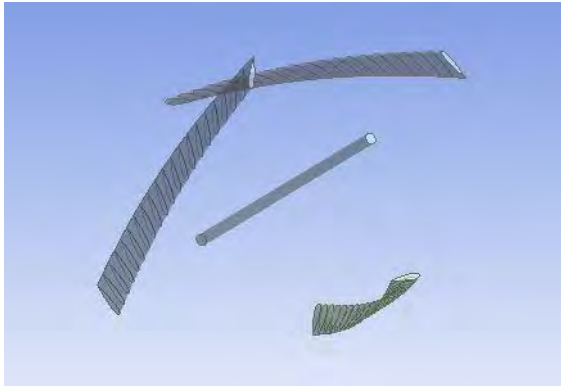
**Gambar 3.2** Skema turbin *helical* (Kurniawan, 2014)

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{H}{\Psi R} \right) \quad (3.1)$$

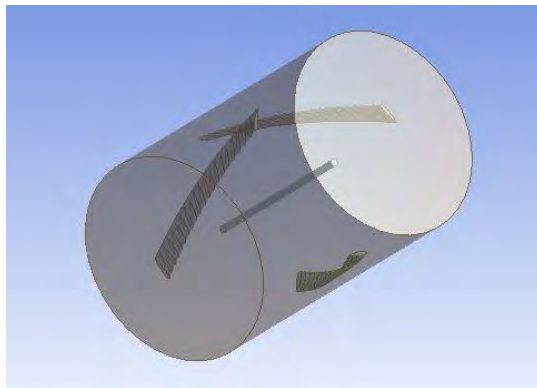
Dimana  $\delta$  adalah sudut inklinasi turbin *helical* dalam radian,  $H$  adalah tinggi turbin,  $R$  adalah jarak *foil* terhadap *shaft* turbin, dan  $\Psi$  adalah sudut fase *surface* atas dengan *surface* bawah pada *foil* turbin dalam radian. Pada penelitian ini dilakukan variasi dengan penambahan jumlah *foil* dalam satu lengan turbin yang memiliki sudut inklinasi yang berbeda. Maka dari itu persamaan (3.1) juga digunakan dalam pembuatan *body foil* untuk variasi turbin.

Tahap kedua adalah membuat *shaft*. Pembuatan *shaft* dilakukan dengan memilih tabung (*cylinder*) dengan diameter dan panjang yang sesuai dengan ukuran *shaft*. Geometri turbin *helical* dapat dilihat pada Gambar 3.3. Setelah pembuatan geometri turbin maka tahap selanjutnya dilakukan pembuatan domain *cylinder* sebagai tempat turbin. *Cylinder* yang telah terbentuk kemudian di-*subtract* dengan domain turbin. Domain *cylinder* digunakan untuk menggambarkan keadaan turbin yang berotasi akibat aliran

air,yang melaluinya. Geometri domain *cylinder* dapat dilihat pada Gambar 3.4.

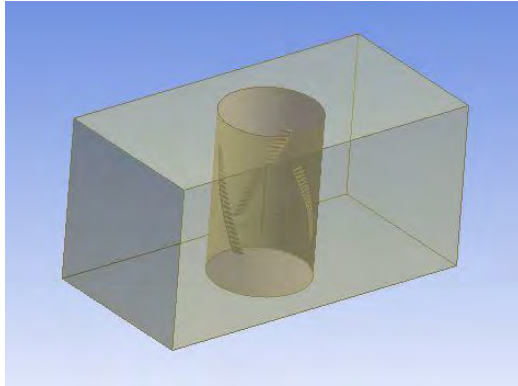


**Gambar 3.3** Geometri turbin *helical*



**Gambar 3.4** Geometri domain *cylinder* sebagai tempat turbin

Apabila geometri turbin dan domain *cylinder* telah terbentuk, maka tahap selanjutnya adalah pembuatan domain laut. Domain laut dibuat dengan memilih kotak (*box*) sesuai dengan ukuran yang digunakan yaitu panjang 300 cm, lebar 150 cm, dan tinggi 150 cm. Domain laut tersebut kemudian di-*subtract* dengan domain *cylinder* sehingga menyatu. Geometri turbin dengan domain laut dan *cylinder* dapat dilihat pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Geometri turbin dengan domain laut dan *cylinder*

### 3.3 Variasi Variabel Penelitian

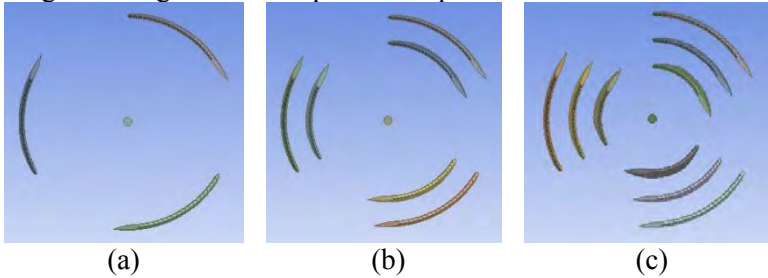
Dalam penelitian ini dilakukan simulasi pada berbagai variasi variabel. Variabel yang divariasikan antara lain jumlah *foil* dalam satu lengan turbin dan kecepatan arus air. Kecepatan arus air yang digunakan antara lain 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, dan 2 m/s untuk masing-masing variasi turbin. Secara rinci variasi turbin dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Variasi Turbin

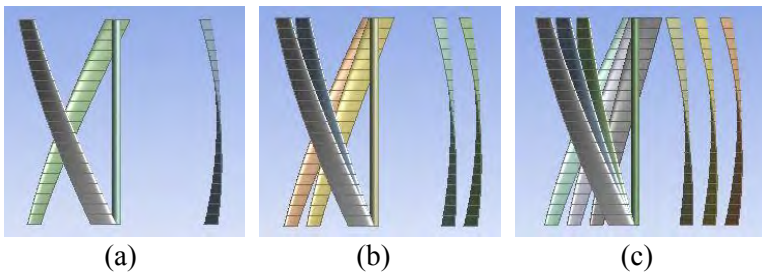
<b>Variasi Turbin</b>	<b>Jumlah <i>Foil</i> dalam Satu Lengan Turbin</b>	<b>Jarak <i>Foil</i> terhadap <i>Shaft</i> Turbin</b>	<b>Sudut Inklinasi <i>Foil</i> Turbin</b>
Model I	1 <i>foil</i>	<i>Foil</i> 1 : 40 cm	<i>Foil</i> 1 : 65°
Model II	2 <i>foil</i> ( <i>Cascade</i> 2 <i>foil</i> )	<i>Foil</i> 1 : 40 cm <i>Foil</i> 2 : 30 cm	<i>Foil</i> 1 : 65° <i>Foil</i> 2 : 70°
Model III	3 <i>foil</i> ( <i>Cascade</i> 3 <i>foil</i> )	<i>Foil</i> 1 : 40 cm <i>Foil</i> 2 : 30 cm <i>Foil</i> 3 : 20 cm	<i>Foil</i> 1 : 65° <i>Foil</i> 2 : 70° <i>Foil</i> 3 : 75°



Geometri turbin tampak atas dengan berbagai variasi dapat dilihat pada Gambar 3.6. Sedangkan geometri turbin tampak samping dengan berbagai variasi dapat dilihat pada Gambar 3.7.



**Gambar 3.6** Geometri turbin tampak atas dengan berbagai variasi  
(a) model I (b) model II (c) model III



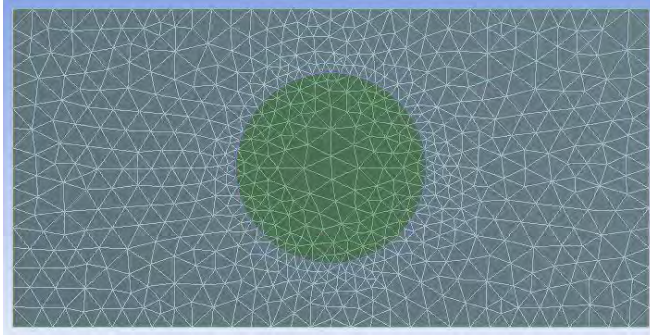
**Gambar 3.7** Geometri turbin tampak samping dengan berbagai variasi  
(a) model I (b) model II (c) model III

### 3.4 *Meshing*

Apabila pembuatan geometri seluruh domain pada berbagai variasi variabel telah dilakukan, maka tahap selanjutnya adalah *meshing*. *Meshing* merupakan proses pemecahan bagian domain menjadi bagian yang lebih kecil-kecil. Bagian tersebut dianggap sebagai sebuah *control volume* yang akan dilakukan perhitungan persamaan konservasi energi, massa, momentum, dan persamaan lainnya dalam *software* CFD.

Dalam melakukan *meshing*, semakin kecil ukuran *mesh* maka semakin akurat hasil simulasi yang didapatkan akan tetapi membutuhkan komputasi yang berat sehingga diperlukan

komputer dengan kemampuan komputasi yang tinggi. Selain ukuran *mesh*, jenis *mesh* juga mempengaruhi tingkat akurasi dari hasil simulasi. Dalam analisis tiga dimensi pada simulasi CFD yang kompleks, jenis *mesh* yang cocok digunakan adalah bentuk tetrahedral. Hasil *meshing* dalam simulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8** Hasil *meshing*

**Tabel 3.3** Ukuran *Mesh* Keseluruhan Domain

No	Nama Bagian	Keterangan <i>Mesh Spacing</i>	Ukuran <i>Mesh</i>
1	<i>Inlet dan Outlet</i>	<i>Angular resolution, [degrees] 18</i>	<i>Min : 0,5 cm Max : 10 cm</i>
2	<i>Box Wall dan Cylinder Wall</i>	<i>Angular resolution, [degrees] 18</i>	<i>Min : 0,5 cm Max : 10 cm</i>
3	<i>Box Curve dan Cylinder Curve</i>	<i>Constant Resolution</i>	<i>Constant Edge Length: 5 cm</i>
4	Turbin	<i>Angular resolution [degrees] 18</i>	<i>Min : 0,05 cm Max : 1 cm</i>

Untuk mendapatkan hasil simulasi yang akurat namun tidak membutuhkan komputasi yang berat, maka dilakukan strategi *meshing* yaitu dengan memberikan ukuran *mesh* yang berbeda setiap domain. Pada bagian domain turbin yang terdiri dari *foil* dan *shaft* ukuran *mesh* dibuat lebih kecil dibandingkan dengan bagian domain yang lain. Hal tersebut dikarenakan pada bagian domain

turbin akan dilakukan pengambilan data berupa gaya dan torsi sehingga membutuhkan tingkat akurasi yang tinggi. Ukuran *mesh* keseluruhan domain dalam simulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.3.

### 3.5 Preprocessing

*Preprocessing* merupakan tahap pendefinisian kondisi batas (*boundary condition*). Pemilihan kondisi batas dilakukan sesuai dengan kondisi benda dan lingkungan sebenarnya agar didapatkan hasil simulasi yang sesuai. Kondisi batas yang digunakan dalam simulasi pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Kondisi batas

- Turbin : Wall
- Laut (atas dan bawah) : Wall
- *Cylinder* (atas dan bawah) : Wall
- Aliran masuk : *Inlet*
- Aliran keluar, kanan, dan kiri : *Opening*
- *Cylinder* : *Interface*

Kondisi kontinyu

- Volume laut : *Fluid*
- Volume *cylinder* : *Fluid*

Setelah pendefinisian kondisi batas maka tahap selajutnya adalah penentuan inisialisasi setiap domain. Penentuan inisialisasi kondisi batas keseluruhan domain dalam simulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.4. Inisialisasi kondisi batas turbin didefinisikan sebagai *no slip* karena terjadi gesekan antara fluida dengan turbin, kemudian digunakan *rotational axis direction* sumbu z untuk memutar turbin dengan sumbu z sebagai pusat rotasi serta pemberian nilai kecepatan rotasi turbin (rpm) hasil ekstrapolasi berdasarkan data yang diperoleh dari hasil eksperimen.

Pada bagian laut (atas dan bawah) dan *cylinder* (atas dan bawah) didefinisikan sebagai *free slip* karena tidak terjadi gesekan dengan fluida. Pada aliran masuk didefinisikan kecepatan arus air yang melalui turbin sedangkan pada bagian aliran keluar, kanan, dan kiri didefinisikan sebagai *opening pressure. and direction*

dengan *relative pressure* 0 Pa yang merepresentasikan kondisi laut dengan arus air dari berbagai arah. Pada bagian *cylinder* didefinisikan sebagai *interface* dengan kedua sisinya berupa *fluid-fluid*.

**Tabel 3.4** Penentuan Inisialisasi Kondisi Batas Keseluruhan Domain

No	Kondisi Batas	Inisialisasi
1	Turbin	<i>No slip, rotational axis direction</i> sumbu z, kecepatan rotasi turbin (rpm)
2	Laut (atas dan bawah)	<i>Free slip</i>
3	<i>Cylinder</i> (atas dan bawah)	<i>Free slip</i>
4	Aliran masuk	<i>Velocity</i>
5	Aliran keluar, kanan, dan kiri	<i>Opening Pressure. and Direction, Relative Pressure 0 Pa</i>
6	<i>Cylinder</i>	<i>Fluid-fluid</i>

Model turbulensi yang digunakan dalam simulasi pada penelitian ini adalah jenis k-epsilon. Model turbulensi k-epsilon merupakan model yang menyelesaikan dua persamaan yaitu persamaan energi kinetik turbulen dan persamaan laju disipasi turbulen sehingga sangat cocok digunakan untuk aliran fluida yang melalui turbin dengan geometri yang kompleks (Sarma dkk., 2014). Selain itu model turbulensi k-epsilon juga memberikan keuntungan berupa efisiensi sumber daya komputasi serta kestabilan perhitungan numerik dan akurasi yang dihasilkan (Tuakia, 2008).

Setelah dilakukan penentuan inisialisasi kondisi batas, maka tahap selanjutnya adalah pengaturan kriteria konvergensi. Nilai kriteria konvergensi yang digunakan dalam simulasi ini pada penelitian ini adalah RMS (*root mean square*) *residual error* sebesar 0,0001. Nilai tersebut didasarkan pada kebutuhan simulasi

dalam bidang *engineering* yang membutuhkan tingkat akurasi yang tinggi (Petri dkk., 2015).

### **3.6 *Processing atau Solving***

*Solving* merupakan proses perhitungan berdasarkan geometri, *meshing*, pendefinisian kondisi batas, dan penentuan inisialisasi yang telah dimasukkan. Proses perhitungan berlangsung hingga mencapai batas nilai *error* yang telah ditentukan sesuai kriteria konvergensi yang digunakan. Dalam simulasi pada penelitian ini, proses *solving* akan selesai atau konvergen ketika nilai yang dihasilkan sudah mencapai *residual error* sebesar 0,0001.

### **3.7 *Postprocessing***

*Postprocessing* merupakan proses terakhir dalam simulasi pada penelitian ini. Pada tahap ini dilakukan pengambilan data hasil simulasi berupa nilai gaya dan torsi. Nilai gaya yang diambil meliputi gaya x, gaya y, dan gaya z. Begitu juga nilai torsi yang diambil meliputi torsi x, torsi y, dan torsi z. Selain itu dilakukan visualisasi hasil simulasi berupa karakteristik aliran yang melalui turbin yang meliputi kontur tekanan aliran, pola kecepatan aliran, dan vektor kecepatan aliran.

### **3.8 *Validasi Hasil Simulasi***

Setelah data hasil simulasi berupa torsi didapatkan, maka tahap selanjutnya adalah validasi hasil simulasi yang dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dari hasil eksperimen. Apabila *error* torsi yang dihasilkan bernilai lebih besar dari 10% maka harus dilakukan simulasi ulang. Simulasi ulang dilakukan dengan mengubah ukuran *mesh* atau mengubah kondisi batas. Apabila *error* torsi yang dihasilkan sudah bernilai lebih kecil dari 10% maka ukuran *mesh* dan kondisi batas dianggap telah sesuai dan mendekati kondisi sebenarnya sehingga dapat digunakan untuk melakukan simulasi pada berbagai variasi variabel dalam penelitian ini.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Validasi Hasil Simulasi

Dalam sebuah penelitian yang berbasis simulasi diperlukan adanya tahapan validasi. Validasi merupakan tahapan penting karena bertujuan untuk mengetahui kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya. Validasi hasil simulasi dapat dilakukan dengan berbagai cara, antara lain menggunakan ukuran *mesh*, kondisi batas, *error* torsi yang dibandingkan dengan hasil eksperimen, dan lain sebagainya.

Pada penelitian ini dilakukan validasi berdasarkan data yang diperoleh dari hasil eksperimen dengan kondisi turbin diletakkan pada kanal terbuka. Validasi dilakukan dengan meninjau ukuran *mesh* dan kondisi batas serta membandingkan nilai torsi resultan yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III. Nilai torsi resultan yang divalidasi adalah torsi resultan yang dihasilkan pada kondisi kecepatan arus air 1,142 m/s. Validasi hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Validasi Hasil Simulasi

Variasi Turbin	Jumlah Mesh	Nilai Torsi (Nm)		Error (%)
		Simulasi	Eksperimen	
Model I	9.817.067	8,83	8,16	7,54
Model II	18.399.188	9,48	8,77	7,51
Model III	24.711.130	16,57	15,26	7,88
Error rata-rata				7,65

Pada ketiga variasi turbin didapatkan *error* masing-masing sebesar 7,54%, 7,51%, dan 7,88% sehingga didapatkan *error* rata-rata sebesar 7,65%. *Error* rata-rata tersebut bernilai lebih kecil dari 10% yang menunjukkan bahwa ukuran *mesh* dan kondisi batas dianggap telah sesuai dan mendekati kondisi sebenarnya sehingga dapat digunakan untuk melakukan simulasi pada berbagai variasi kecepatan arus air dalam penelitian ini (Petri dkk., 2015).



## 4.2 Gaya dan Torsi yang Dihasilkan Turbin

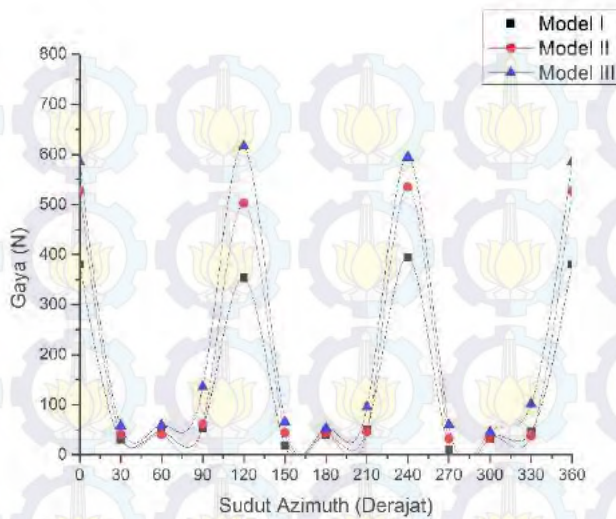
Gaya dan torsi merupakan variabel penting yang mempengaruhi performansi turbin. Turbin yang berotasi akan menghasilkan gaya dan torsi pada setiap *foil* dan *shaft*. Setiap *foil* dan *shaft* turbin memiliki gaya dan torsi yang searah dengan sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. Gaya yang searah dengan sumbu z merupakan gaya yang menghasilkan getaran turbin secara horizontal. Apabila nilai gaya yang searah dengan sumbu z terlalu besar maka dapat mengganggu kinerja turbin karena getaran yang dihasilkan juga besar. Nilai gaya yang searah dengan sumbu z yang didapatkan dari hasil simulasi relatif kecil sehingga dapat diabaikan. Oleh karena itu gaya total yang dihasilkan turbin merupakan resultan antara gaya yang searah dengan sumbu x dan sumbu y. Begitu pula dengan torsi total yang dihasilkan turbin juga merupakan resultan antara torsi yang searah dengan sumbu x dan sumbu y.

### 4.2.1 Pola resultan gaya dan torsi

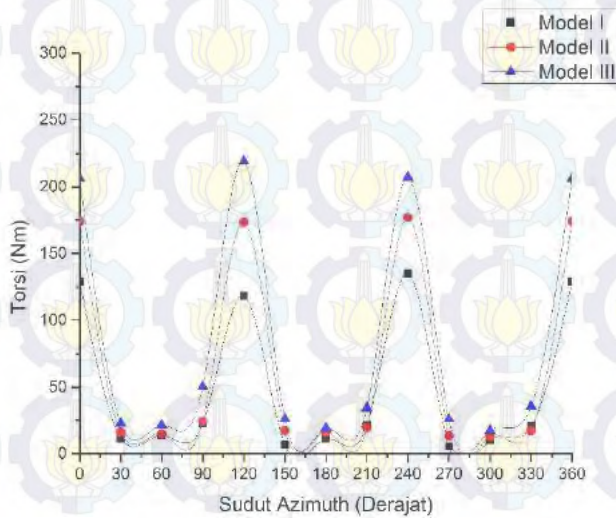
Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan kondisi *transient* sehingga dapat diperoleh pola resultan gaya dan torsi pada setiap 30 derajat sudut azimuth selama turbin berotasi satu putaran penuh yaitu 360 derajat. Pola resultan gaya dan torsi yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III pada kecepatan arus air 1 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2.

Resultan gaya dan torsi pada setiap sudut azimuth memiliki pola yang sama yaitu membentuk grafik sinusoidal. Pola resultan gaya dan torsi juga memiliki nilai tertinggi pada sudut azimuth yang sama yaitu sudut azimuth 120 derajat, 240 derajat, dan 360 derajat. Hal tersebut disebabkan karena secara teoritis torsi merupakan fungsi gaya sehingga menghasilkan pola yang sama. Bentuk grafik sinusoidal dengan perulangan nilai tertinggi pada tiga sudut azimuth menunjukkan bahwa turbin memiliki tiga lengan dengan masing-masing lengan terdapat *foil*. *Foil* tersebut akan berotasi dan menempati posisi *foil* yang lain dengan formasi yang sama sehingga menyebabkan perulangan pada ketiga sudut azimuth tersebut dapat terjadi.





**Gambar 4.1** Pola resultan gaya yang dihasilkan turbin



**Gambar 4.2** Pola resultan torsi yang dihasilkan turbin

Nilai gaya dan torsi tertinggi yang dihasilkan turbin pada kecepatan arus air 1 m/s dapat dilihat pada Tabel 4.2. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa variasi turbin yang dikembangkan yaitu turbin model II dan model III selalu mengalami peningkatan nilai gaya dan torsi dibandingkan dengan turbin model I. Turbin model III memiliki nilai gaya dan torsi paling tinggi dibandingkan dengan kedua model lainnya. Peningkatan yang terjadi tidak hanya pada sudut azimuth 120 derajat, 240 derajat, dan 360 derajat akan tetapi terjadi pada setiap sudut azimuth. Peningkatan nilai gaya dan torsi disebabkan karena turbin model II dan model III mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan arus air yang lebih besar dibandingkan dengan turbin model I.

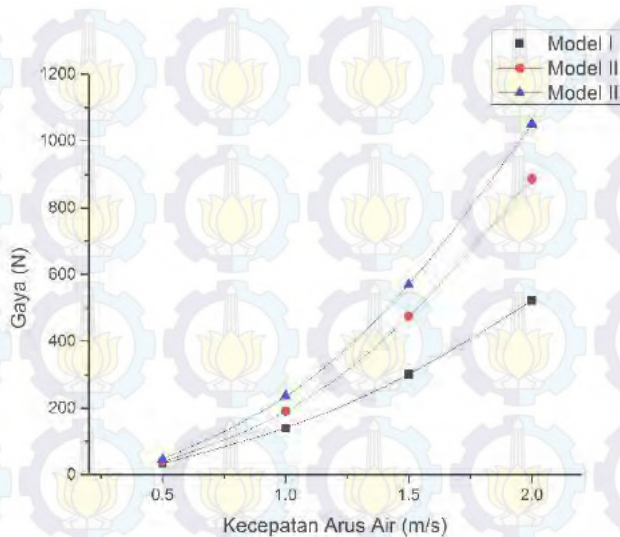
**Tabel 4.2** Nilai Gaya dan Torsi Tertinggi yang Dihasilkan Turbin Pada Kecepatan Arus Air 1 m/s

Variasi Turbin	Sudut Azimuth	Gaya (N)	Torsi (Nm)
Model I	120 Derajat	353,22	118,12
	240 Derajat	393,65	134,88
	360 Derajat	379,80	128,90
Model II	120 Derajat	502,69	173,53
	240 Derajat	535,16	177,09
	360 Derajat	526,57	174,09
Model III	120 Derajat	616,44	219,20
	240 Derajat	594,59	206,85
	360 Derajat	585,24	205,98

#### 4.2.2 Pengaruh variasi kecepatan arus air

Gaya dan torsi yang dihasilkan turbin dipengaruhi oleh kecepatan arus air yang melaluinya. Maka dari itu kecepatan arus air merupakan parameter penting untuk menentukan performansi turbin. Pada penelitian ini dilakukan empat variasi kecepatan arus air yaitu 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, dan 2 m/s. Variasi tersebut diambil berdasarkan potensi kecepatan arus air di Indonesia yang berkisar 0,5 m/s hingga 2 m/s. Selain itu variasi tersebut juga dapat digunakan untuk memprediksi gaya dan torsi yang dihasilkan

turbin dengan variasi model I, II, dan III pada kecepatan di atas 2 m/s.



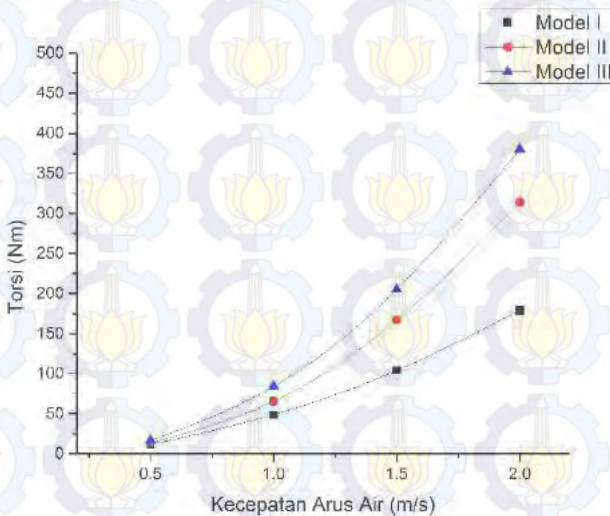
**Gambar 4.3** Peningkatan gaya yang dihasilkan turbin

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa gaya terendah yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III masing-masing sebesar 34,09 N, 39,39 N, dan 46,84 N. Nilai-nilai tersebut didapatkan pada kecepatan arus air 0,5 m/s. Sedangkan gaya tertinggi yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III masing-masing sebesar 522,44 N, 887,27 N, dan 1.049,83 N. Nilai-nilai tersebut didapatkan pada kecepatan arus air 2 m/s. Semakin tinggi kecepatan arus air yang melalui turbin dengan variasi model I, II, dan III maka gaya yang dihasilkan juga semakin tinggi.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa torsi terendah yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III masing-masing sebesar 11,56 Nm, 13,83 Nm, dan 16,63 Nm. Nilai-nilai tersebut didapatkan pada kecepatan arus air 0,5 m/s. Sedangkan torsi tertinggi yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III masing-masing sebesar 179,49 Nm, 314,48 Nm, dan 380,11 Nm. Nilai tersebut didapatkan pada kecepatan arus air 2 m/s. Semakin



tinggi kecepatan arus air yang melalui turbin dengan variasi model I, II, dan III maka torsi yang dihasilkan juga semakin tinggi.



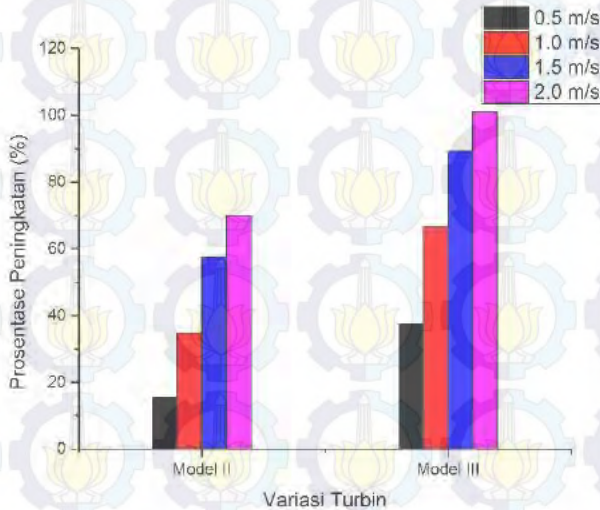
**Gambar 4.4** Peningkatan torsi yang dihasilkan turbin

Peningkatan gaya dan torsi dengan variasi kecepatan arus air dapat terjadi karena secara teoritis torsi yang dihasilkan turbin ditentukan oleh massa jenis fluida yang mengalir, luas sapuan yang mengenai turbin, dan pangkat dua dari kecepatan arus air yang melalui turbin. Selain itu torsi juga merupakan fungsi gaya sehingga semakin tinggi kecepatan arus air maka gaya dan torsi yang dihasilkan turbin juga semakin tinggi.

#### 4.2.3 Pengaruh variasi model turbin

Variasi turbin yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah turbin model II dan model III. Pada pembahasan sebelumnya telah dijelaskan bahwa turbin model II dan model III menghasilkan gaya dan torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin model I. Selain itu peningkatan kecepatan arus air juga meningkatkan gaya dan torsi pada turbin model II dan model III. Untuk mengetahui prosentase peningkatan gaya dan torsi turbin model II dan model

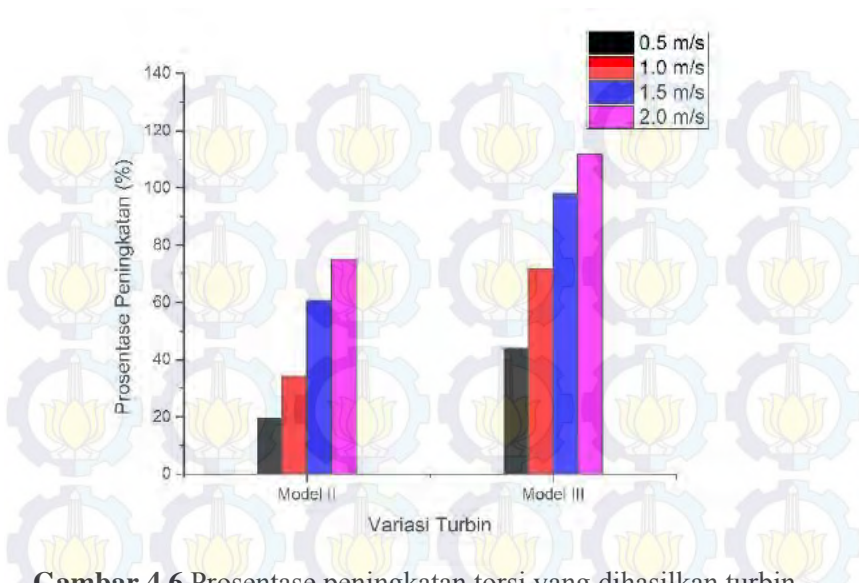
III terhadap turbin model I pada variasi kecepatan arus air dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan 4.6.



**Gambar 4.5** Prosentase peningkatan gaya yang dihasilkan turbin

Prosentase peningkatan gaya yang dihasilkan turbin model II terhadap turbin model I pada kecepatan arus air 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, dan 2 m/s masing-masing sebesar 15,53%, 34,87%, 57,60%, dan 69,83%. Sedangkan prosentase peningkatan gaya yang dihasilkan turbin model III terhadap turbin model I pada kecepatan arus air 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, dan 2 m/s masing-masing sebesar 37,38%, 66,62%, 89,20%, dan 100,95%.

Prosentase peningkatan torsi yang dihasilkan turbin model II terhadap turbin model I pada kecepatan arus air 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, dan 2 m/s masing-masing sebesar 19,64%, 34,16%, 60,63%, dan 75,20%. Sedangkan prosentase peningkatan torsi yang dihasilkan turbin model III terhadap turbin model I pada kecepatan arus air 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, dan 2 m/s masing-masing sebesar 43,87%, 71,75%, 97,94%, dan 111,77%.



**Gambar 4.6** Prosentase peningkatan torsi yang dihasilkan turbin

Peningkatan gaya dan torsi yang dihasilkan turbin model II dan model III disebabkan karena turbin memiliki lebih dari satu *foil* dalam satu lengan. Oleh karena itu turbin model II dan model III mendapatkan tekanan total yang lebih besar karena masing-masing *foil* mendapatkan distribusi tekanan dari kecepatan arus air yang melalui turbin. Pada kecepatan arus air 2 m/s prosentase peningkatan gaya dan torsi yang dihasilkan turbin model III mencapai lebih dari 100%. Prosentase peningkatan yang tinggi ini dapat mempengaruhi efisiensi turbin karena efisiensi turbin berbanding terbalik dengan pangkat tiga dari kecepatan arus air. Maka dari itu dibutuhkan prosentase peningkatan gaya dan torsi yang tinggi agar penurunan efisiensi turbin tidak terlalu besar akibat kenaikan kecepatan arus air.

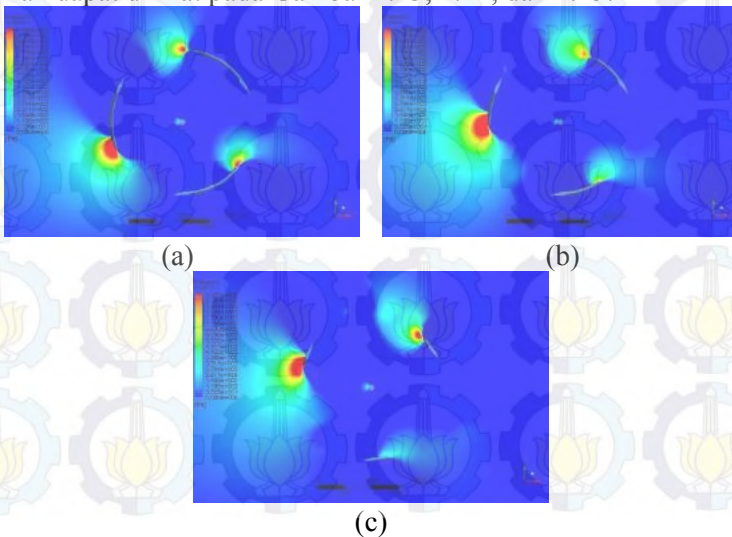
### 4.3 Karakteristik Aliran yang Melalui Turbin

Karakteristik aliran yang melalui turbin berupa kontur tekanan aliran, pola kecepatan aliran, dan vektor kecepatan aliran merupakan fenomena-fenomena yang sulit diamati dalam sebuah

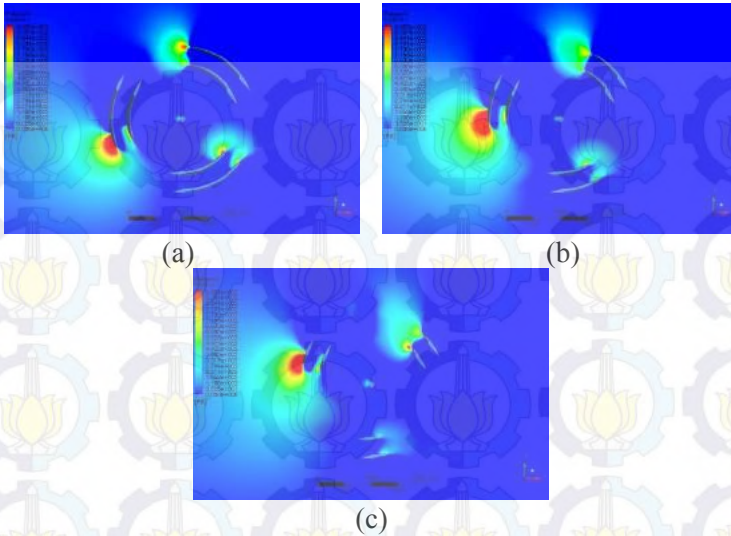


eksperimen. Maka dari itu dengan penelitian yang berbasis simulasi CFD ini dapat diamati terjadinya fenomena-fenomena tersebut. Karakteristik aliran yang didapatkan dari hasil simulasi juga dapat digunakan untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi performansi turbin.

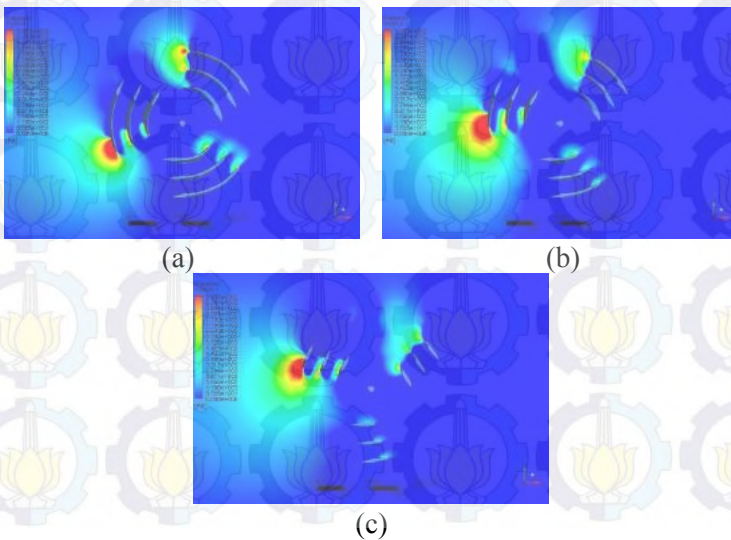
Visualisasi karakteristik aliran yang melalui turbin ditampilkan secara tiga dimensi. Hal ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan distribusi tekanan dan kecepatan arus air pada masing-masing *foil* yang terletak di bagian ujung atas dan bawah *foil* maupun di bagian tengah *foil*. Visualisasi karakteristik aliran yang melalui turbin dilakukan dengan memotong turbin secara horizontal pada bagian bawah, tengah, dan atas masing-masing terletak pada posisi 0,1 m, 0,4 m, dan 0,7 m dari tinggi turbin. Visualisasi karakteristik aliran yang melalui turbin diambil pada posisi sudut azimuth 120 derajat dengan kecepatan arus air 1 m/s. Visualisasi kontur tekanan aliran dapat dilihat pada Gambar 4.7, 4.8, dan 4.9. Visualisasi pola kecepatan aliran dapat dilihat pada Gambar 4.10, 4.11, dan 4.12. Visualisasi vektor kecepatan aliran dapat dilihat pada Gambar 4.13, 4.14, dan 4.15.



**Gambar 4.7** Kontur tekanan aliran pada turbin model I dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas

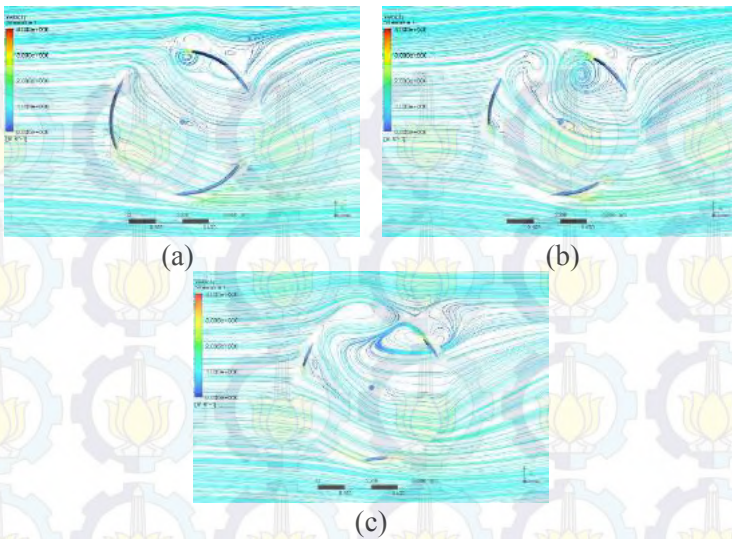


**Gambar 4.8** Kontur tekanan aliran pada turbin model II dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas

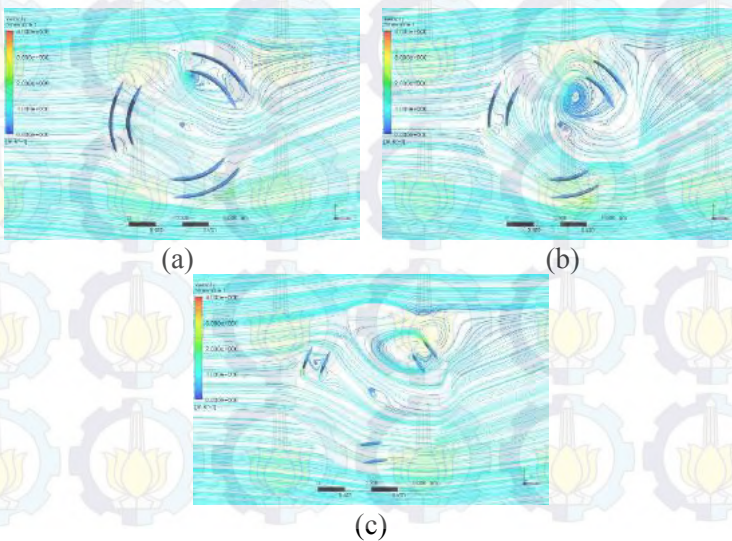


**Gambar 4.9** Kontur tekanan aliran pada turbin model III dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas

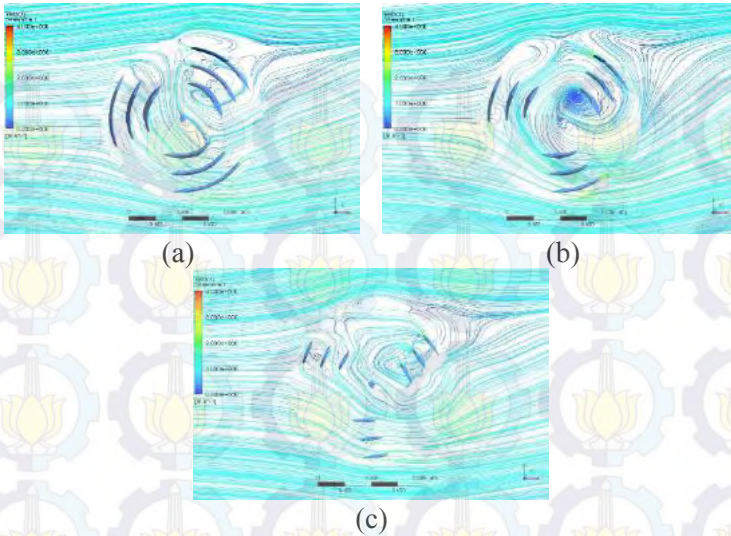




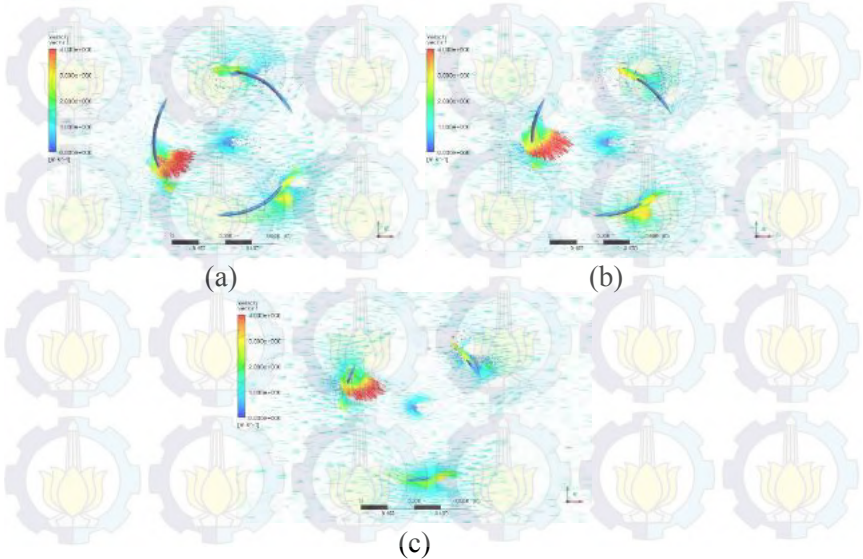
**Gambar 4.10** Pola Kecepatan aliran pada turbin model I dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas



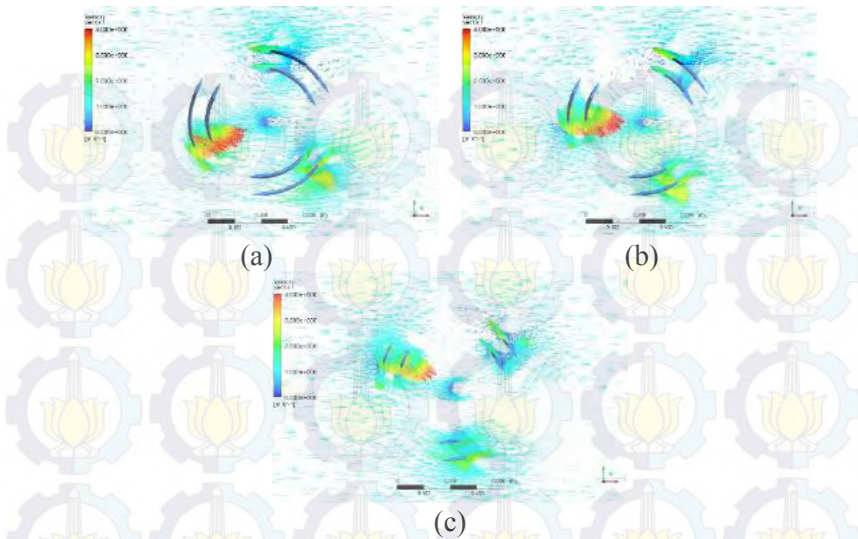
**Gambar 4.11** Pola Kecepatan aliran pada turbin model II dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas



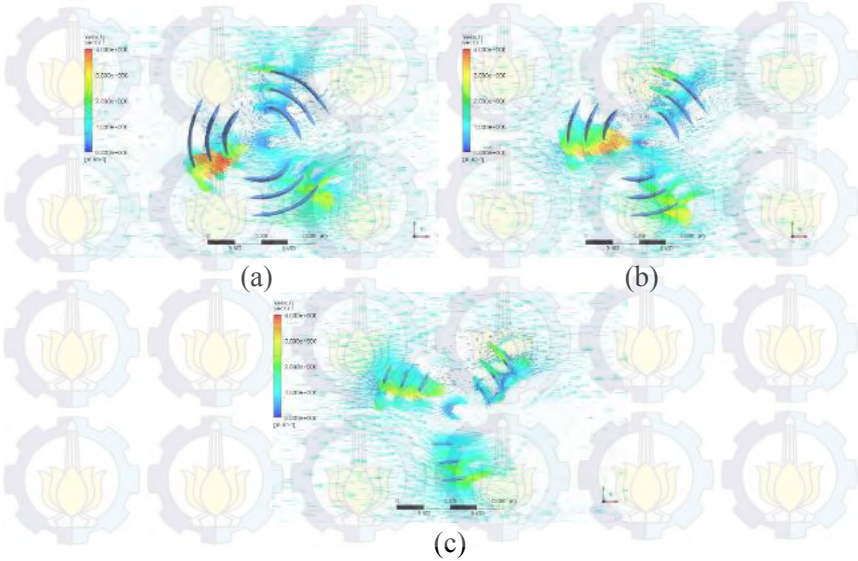
**Gambar 4.12** Pola Kecepatan aliran pada turbin model III dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas



**Gambar 4.13** Vektor Kecepatan aliran pada turbin model I dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas



**Gambar 4.14** Vektor Kecepatan aliran pada turbin model II dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas

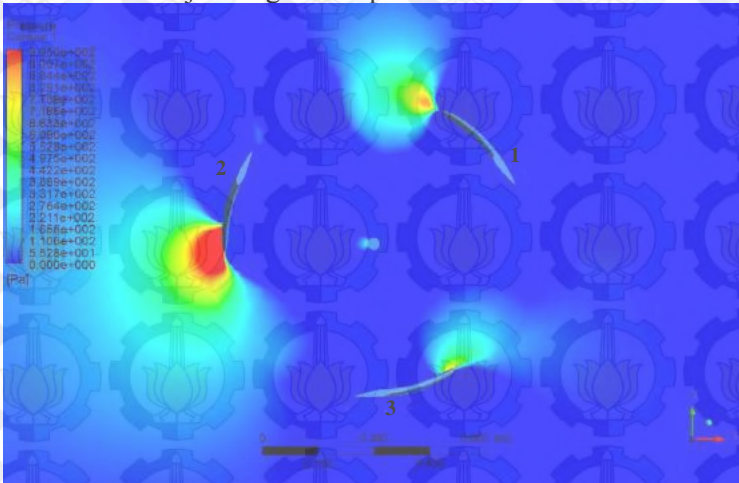


**Gambar 4.15** Vektor Kecepatan aliran pada turbin model III dengan perpotongan (a) bawah (b) tengah (c) atas



#### 4.3.1 Karakteristik kontur tekanan aliran

Turbin menghasilkan gaya dan torsi tertinggi pada sudut azimuth 120 derajat, 240 derajat, dan 360 derajat. Hal ini disebabkan karena setiap *foil* yang menempati posisi ketiga sudut azimuth tersebut mendapatkan tekanan paling besar. Untuk mengetahui kontur tekanan aliran yang melalui turbin dengan variasi model I, II, dan III dapat dilihat pada Gambar 4.16, 4.17, dan 4.18. Kontur tekanan aliran tersebut diambil pada posisi sudut azimuth 120 derajat dengan kecepatan arus air 1 m/s.

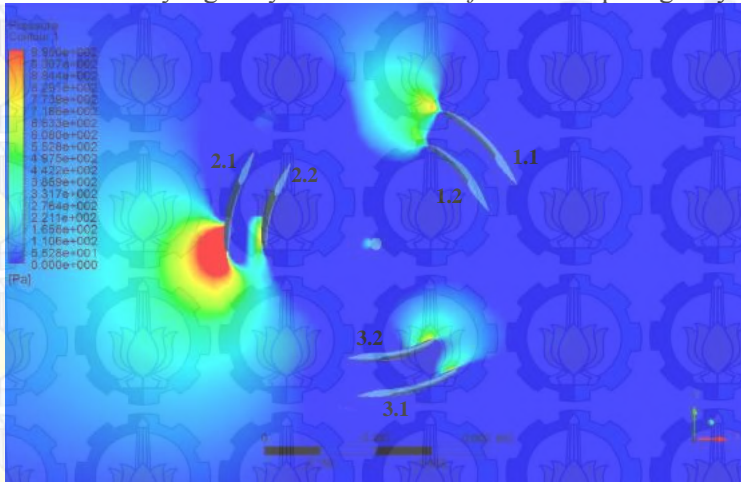


**Gambar 4.16** Kontur tekanan aliran pada turbin model I

Turbin model I mendapatkan tekanan pada *foil* 1, 2, dan 3 masing-masing sebesar 1524,59 Pa, 2360,19 Pa, dan 923,95 Pa. *Foil* 2 mendapatkan tekanan paling besar karena berada pada daerah yang langsung mendapatkan aliran *upstream* dan tidak mendapatkan *wake* yang dihasilkan oleh *foil* lain. *Foil* 1 dan 3 mendapatkan tekanan lebih kecil karena tidak mendapatkan aliran secara langsung dari *upstream* dan sudah mendapatkan *wake* dari aliran yang melewati *foil* 2.

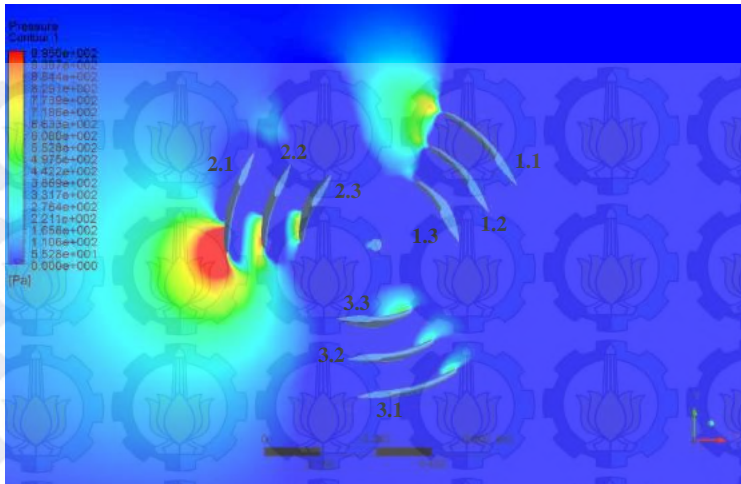
Turbin model II mendapatkan tekanan pada *foil* 1.1 dan 1.2 masing-masing sebesar 1094,34 Pa dan 941,01 Pa. Pada *foil* 2.1 dan 2.2 masing-masing sebesar 2086,72 Pa dan 968,73 Pa.

Sedangkan pada *foil* 3.1 dan 3.2 masing-masing sebesar 666,60 Pa dan 893,10 Pa. Turbin model II mendapatkan distribusi tekanan di semua *foil* pada masing-masing lengan. Oleh karena itu turbin model II yang memiliki dua *foil* di setiap lengannya akan mendapatkan tekanan total yang lebih besar dibandingkan dengan turbin model I yang hanya memiliki satu *foil* di setiap lengannya.



**Gambar 4.17** Kontur tekanan aliran pada turbin model II

Turbin model III mendapatkan tekanan pada *foil* 1.1, 1.2, dan 1.3 masing-masing sebesar 911,13 Pa, 812,06 Pa, dan 714,09 Pa. Pada *foil* 2.1, 2.2, dan 2.3 masing-masing sebesar 1.999,31 Pa, 1.001,69 Pa, dan 831,35 Pa. Sedangkan pada *foil* 3.1, 3.2, dan 3.3 masing-masing sebesar 574,12 Pa, 621,81 Pa, dan 803,51 Pa. Turbin model III mendapatkan distribusi tekanan di semua *foil* pada masing-masing lengan. Oleh karena itu turbin model III yang memiliki tiga *foil* di setiap lengannya akan mendapatkan tekanan total yang lebih besar dibandingkan dengan turbin model I yang hanya memiliki satu *foil* di setiap lengannya. Maka dari itu turbin model II dan model III dapat menghasilkan gaya dan torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin model I. Hal tersebut sesuai dengan nilai gaya dan torsi yang dihasilkan turbin pada Tabel 4.2.



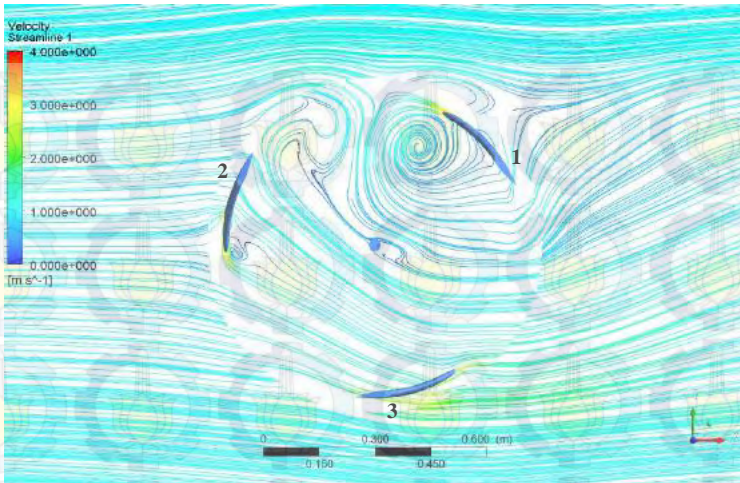
**Gambar 4.18** Kontur tekanan aliran pada turbin model III

#### 4.3.2 Karakteristik pola kecepatan aliran

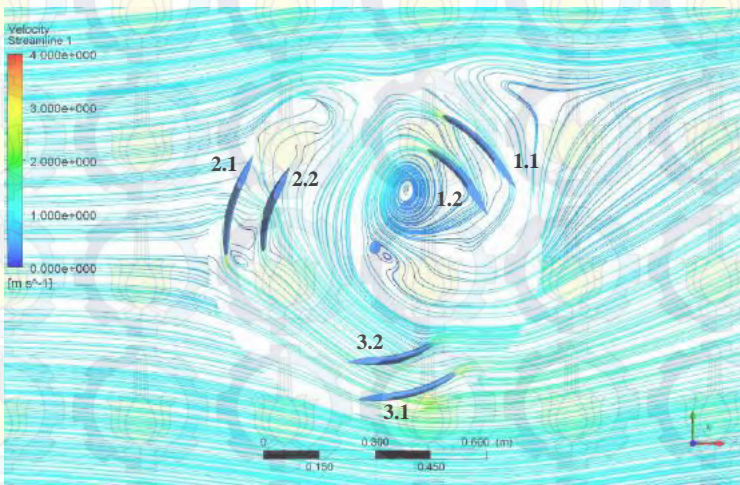
Pola kecepatan aliran yang melalui turbin berpengaruh terhadap performansi turbin. Pola kecepatan aliran digunakan untuk mengetahui *wake* yang tersusun dari interaksi *vortex* saat mengenai *foil* turbin. Untuk mengetahui pola kecepatan aliran yang melalui turbin dengan variasi model I, II, dan III dapat dilihat pada Gambar 4.19, 4.20, dan 4.21. Pola kecepatan aliran tersebut diambil pada posisi sudut azimuth 120 derajat dengan kecepatan arus air 1 m/s.

*Foil 1* pada turbin model I mendapatkan *vortex* dari aliran setelah melewati *foil 2*. *Vortex* tersebut menyebabkan *foil 1* mengalami penurunan tekanan dan kecepatan arus air. Akan tetapi *foil 1* masih mendapatkan tekanan yang lebih besar dari *foil 3* meskipun *foil 3* tidak mendapatkan *vortex* dari aliran setelah melewati *foil 2*. Hal tersebut dikarenakan *foil 1* ketika mendapatkan aliran berada dalam posisi penampang lebih besar (*leading edge*). Sedangkan *foil 3* ketika mendapatkan aliran berada dalam posisi penampang lebih kecil (*trailing edge*).





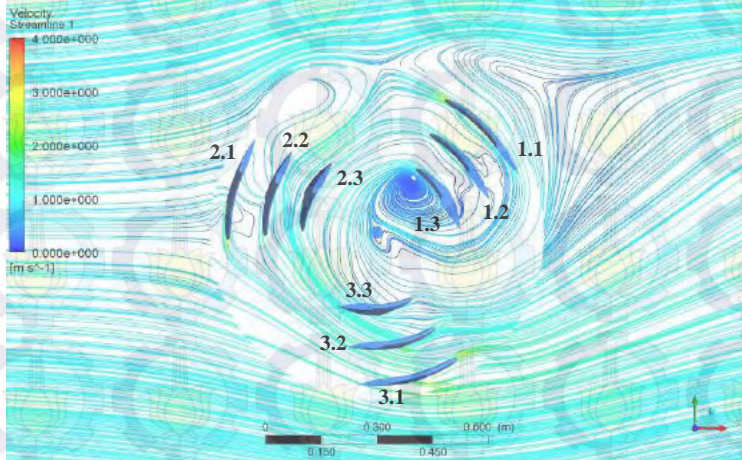
**Gambar 4.19** Pola Kecepatan aliran pada turbin model I



**Gambar 4.20** Pola Kecepatan aliran pada turbin model II

Turbin model II dan model III hanya mendapatkan *vortex* pada *foil* yang terdekat dengan *shaft* yaitu *foil* 1.2 untuk turbin model II dan *foil* 1.3 untuk turbin model III. Maka dari itu *foil* tersebut yang mendapatkan tekanan paling rendah dibandingkan

dengan *foil* lainnya dalam satu lengan. Selain itu *foil* tersebut juga mengalami penurunan kecepatan arus air. Meskipun *vortex* yang melalui turbin model II dan model III memiliki tingkat turbulensi lebih besar dari turbin model I, namun *vortex* tersebut hanya mempengaruhi satu *foil* saja sehingga *foil-foil* yang lain tetap mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan arus air. Maka dari itu turbin model II dan model III dapat menghasilkan gaya dan torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin model I.



**Gambar 4.21** Pola Kecepatan aliran pada turbin model III

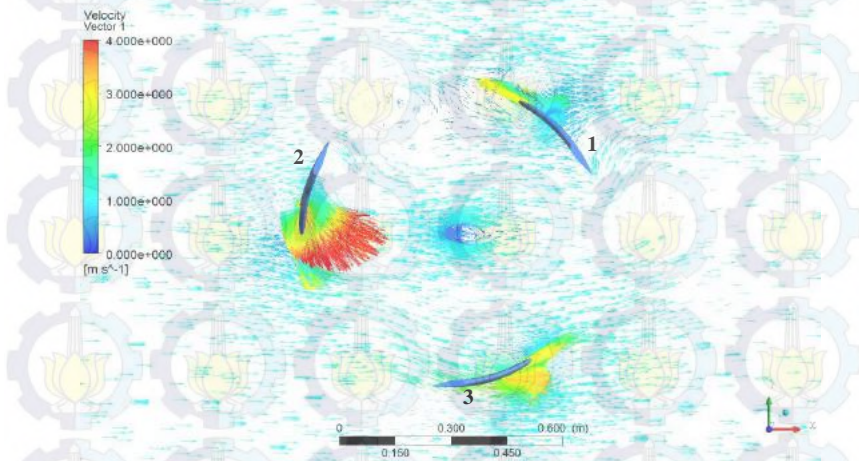
#### 4.3.3 Karakteristik vektor kecepatan aliran

Vektor kecepatan aliran merupakan parameter penting untuk mengetahui distribusi dan arah kecepatan arus air pada masing-masing *foil* turbin. Apabila distribusi dan arah kecepatan arus air tidak merata, maka ekstraksi energi yang dihasilkan turbin akan berkurang. Untuk mengetahui vektor kecepatan aliran yang melalui turbin dengan variasi model I, II, dan III dapat dilihat pada Gambar 4.22, 4.23, dan 4.24. Pola kecepatan aliran tersebut diambil pada posisi sudut azimuth 120 derajat dengan kecepatan arus air 1 m/s.

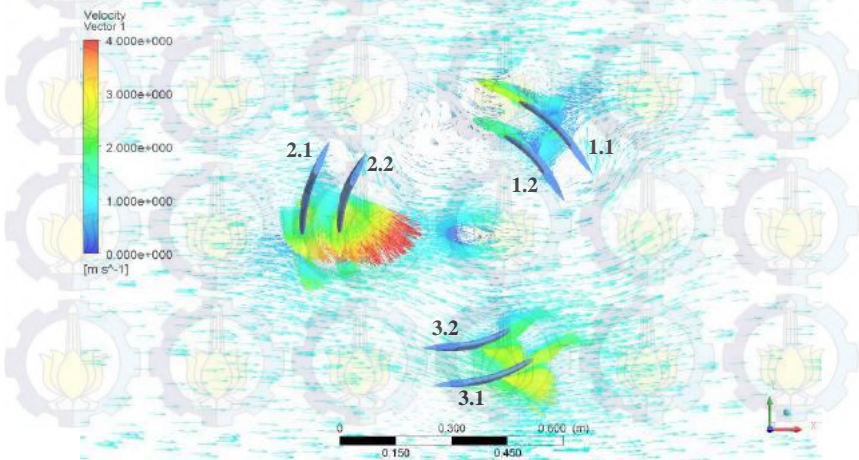
Turbin model I mendapatkan kecepatan arus air pada *foil* 1, 2, dan 3 masing-masing sebesar 3,02 m/s, 6,52 m/s, dan 3,68 m/s. *Foil* 2 mendapatkan kecepatan arus air paling tinggi karena berada pada



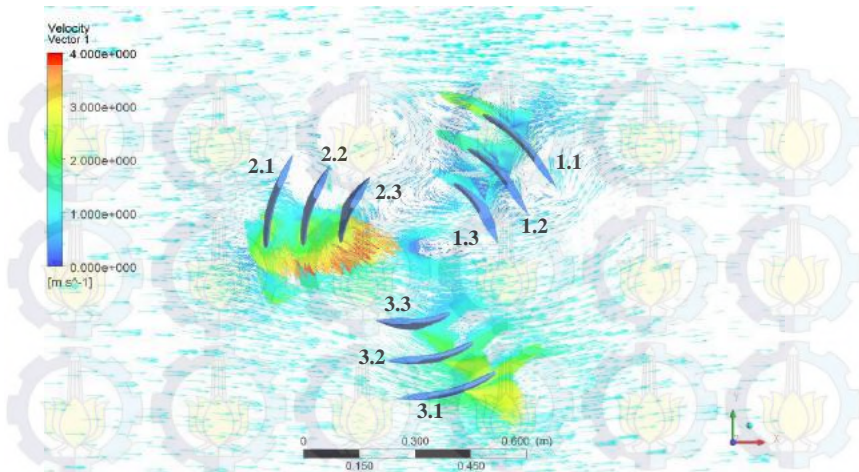
daerah yang langsung mendapatkan aliran *upstream* dan tidak mendapatkan *wake* yang dihasilkan oleh *foil* lain. *Foil* 1 dan 3 mendapatkan kecepatan arus lebih rendah karena tidak mendapatkan aliran secara langsung dari *upstream* dan sudah mendapatkan *wake* dari aliran yang melewati *foil* 2.



**Gambar 4.22** Vektor Kecepatan aliran pada turbin model I



**Gambar 4.23** Vektor Kecepatan aliran pada turbin model II



**Gambar 4.24** Vektor Kecepatan aliran pada turbin model III

Turbin model II mendapatkan kecepatan arus air pada *foil* 1.1 dan 1.2 masing-masing sebesar 2,55 m/s dan 1,96 m/s. Pada *foil* 2.1 dan 2.2 masing-masing sebesar 5,21 m/s dan 5,01 m/s. Sedangkan pada *foil* 3.1 dan 3.2 masing-masing sebesar 3,57 m/s dan 2,98 m/s. Turbin model II mendapatkan distribusi kecepatan arus air di semua *foil* pada masing-masing lengan. Oleh karena itu turbin model II yang memiliki dua *foil* di setiap lengannya akan mendapatkan kecepatan arus air total yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin model I yang hanya memiliki satu *foil* di setiap lengannya.

Turbin model III mendapatkan tekanan pada *foil* 1.1, 1.2, dan 1.3 masing-masing sebesar 2,36 m/s, 2,08 m/s, dan 1,84 m/s. Pada *foil* 2.1, 2.2, dan 2.3 masing-masing sebesar 4,94 m/s, 4,39 m/s, dan 3,53 m/s. Sedangkan pada *foil* 3.1, 3.2, dan 3.3 masing-masing sebesar 3,50 m/s, 2,81 m/s, dan 2,21 m/s. Turbin model III mendapatkan distribusi kecepatan arus air di semua *foil* pada masing-masing lengan. Oleh karena itu turbin model III yang memiliki tiga *foil* di setiap lengannya akan mendapatkan kecepatan arus air total yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin model I yang hanya memiliki satu *foil* di setiap lengannya. Maka dari itu

turbin model II dan model III dapat menghasilkan gaya dan torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin model I. Hal tersebut sesuai dengan nilai gaya dan torsi yang dihasilkan turbin pada Tabel 4.2.

#### 4.4 Diskusi

Turbin hidrokinetik merupakan salah satu jenis teknologi untuk mengkonversi energi air menjadi energi listrik. Teknologi ini banyak dikembangkan karena memanfaatkan energi hidrokinetik yang merupakan energi alternatif terbarukan. Perkembangan turbin hidrokinetik bertujuan untuk meningkatkan performansi turbin agar ekstraksi energi yang dihasilkan semakin besar. Salah satu cara untuk meningkatkan performansi turbin hidrokinetik adalah dengan mengubah parameter desain turbin. Selain itu kecepatan arus air juga mempengaruhi performansi turbin.

Parameter desain yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah modifikasi turbin *helical* (model I) menjadi turbin *helical cascade 2 foil* (model II) dan turbin *helical cascade 3 foil* (model III). Untuk mengetahui peningkatan performansi turbin arus air yang dikembangkan adalah dengan melihat nilai gaya dan torsi yang dihasilkan turbin. Turbin dengan variasi model I, II, dan III menghasilkan pola resultan gaya dan torsi yang sama. Nilai resultan gaya dan torsi tertinggi yang dihasilkan turbin didapatkan pada posisi sudut azimuth 120 derajat, 240 derajat, dan 360 derajat.

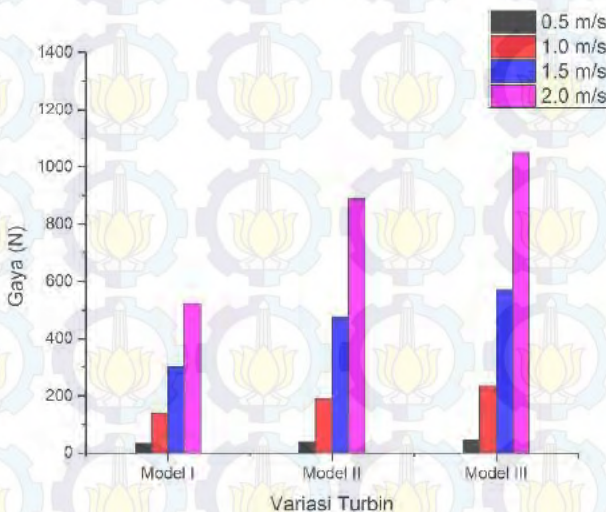
Gaya total yang dihasilkan turbin merupakan resultan antara gaya yang searah dengan sumbu x dan sumbu y. Begitu pula dengan torsi total yang dihasilkan turbin juga merupakan resultan antara torsi yang searah dengan sumbu x dan sumbu y. Nilai gaya yang searah dengan sumbu z yang didapatkan dari hasil simulasi relatif kecil sehingga dapat diabaikan. Apabila nilai gaya yang searah dengan sumbu z terlalu besar maka akan mengganggu kinerja turbin karena getaran yang dihasilkan juga besar.

Gaya dan torsi yang dihasilkan turbin juga dipengaruhi oleh kecepatan arus air yang melaluinya. Secara teoritis torsi yang dihasilkan turbin ditentukan oleh massa jenis fluida yang mengalir, luas sapuan yang mengenai turbin, dan pangkat dua dari kecepatan



arus air yang melalui turbin. Selain itu torsi juga merupakan fungsi gaya sehingga semakin tinggi kecepatan arus air maka gaya dan torsi yang dihasilkan turbin juga semakin tinggi.

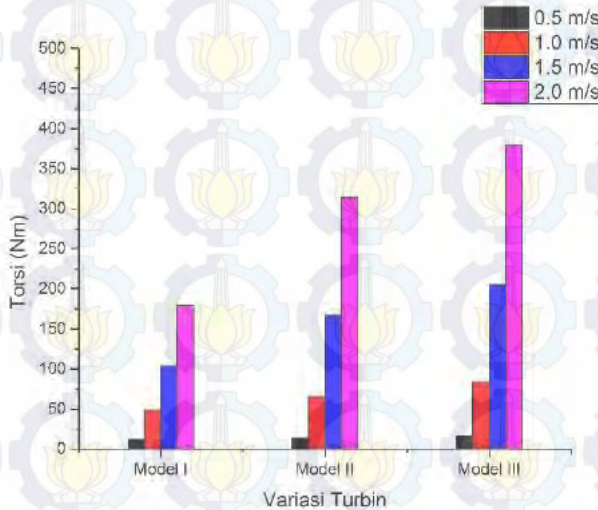
Gaya dan torsi yang dihasilkan turbin model II dan model III selalu mengalami peningkatan dibandingkan dengan turbin model I pada berbagai variasi kecepatan arus air. Untuk mengetahui perbandingan gaya dan torsi yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III pada berbagai kecepatan arus air dapat dilihat pada Gambar 4.25 dan 4.26.



**Gambar 4.25** Perbandingan gaya yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III

Prosentase peningkatan gaya yang dihasilkan turbin model II terhadap turbin model I pada kecepatan arus air 0,5-2 m/s adalah 15,53-69,83%. Sedangkan prosentase peningkatan gaya turbin model III terhadap turbin model I pada kecepatan arus air 0,5-2 m/s adalah 37,38-100,95%. Prosentase peningkatan torsi yang dihasilkan turbin model II terhadap turbin model I pada kecepatan arus air 0,5-2 m/s adalah 19,64-75,20%. Sedangkan prosentase

peningkatan torsi turbin model III terhadap turbin model I pada kecepatan arus air 0,5-2 m/s adalah 43,87-111,77%.

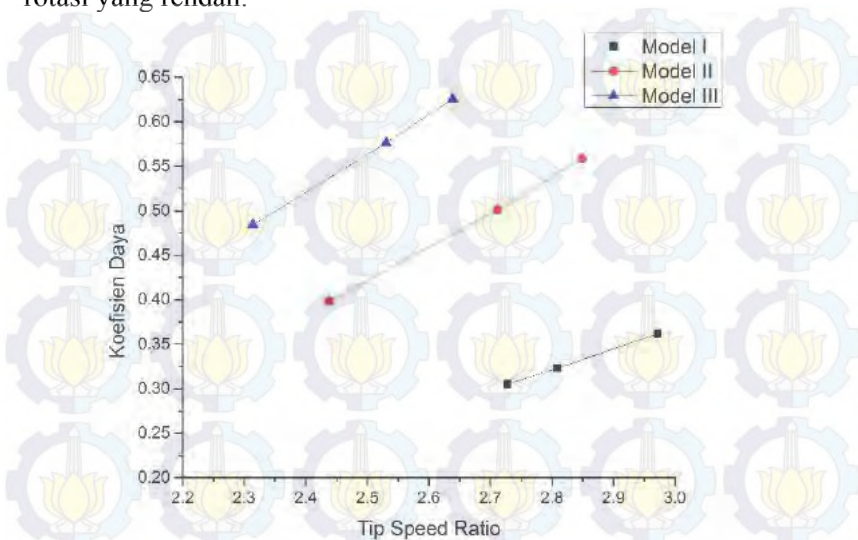


**Gambar 4.26** Perbandingan torsi yang dihasilkan turbin dengan variasi model I, II, dan III

Penambahan jumlah *foil* dalam satu lengan turbin mempengaruhi nilai *solidity* turbin. Turbin dengan variasi model I, II, dan III memiliki nilai *solidity* masing-masing sebesar 0,119, 0,239, dan 0,358. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah *foil* dalam satu lengan turbin maka nilai *solidity* turbin juga semakin tinggi. Pengaruh *solidity* turbin dapat diketahui dengan melihat nilai koefisien daya turbin terhadap perubahan *tip speed ratio*. Hal tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 4.27.

Turbin dengan variasi model I, II, dan III memiliki rentang nilai *tip speed ratio* sebesar 2,31 hingga 2,97. Turbin model III dengan nilai *solidity* tertinggi memiliki koefisien daya paling tinggi namun memiliki rentang nilai *tip speed ratio* yang rendah apabila dibandingkan dengan turbin model I dan model II. Hal tersebut disebabkan karena turbin dengan nilai *solidity* yang tinggi memiliki

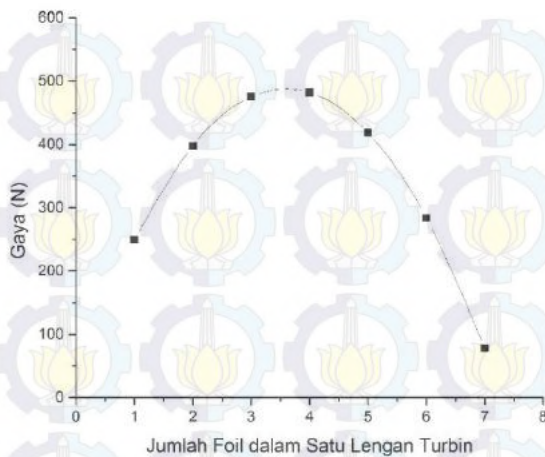
momen inersia yang besar sehingga akan menghasilkan kecepatan rotasi yang rendah.



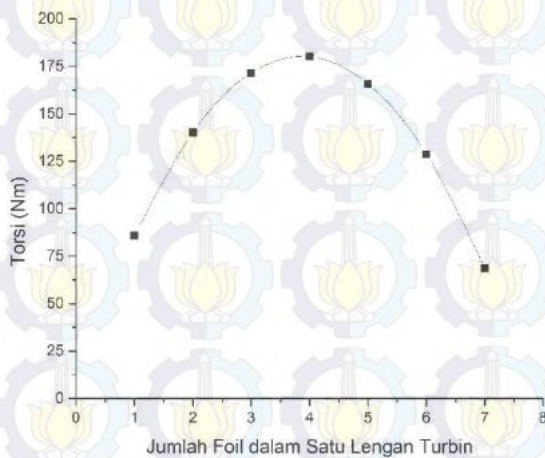
**Gambar 4.27** Pengaruh *tip speed ratio* terhadap koefisien daya turbin

Apabila turbin yang dikembangkan dalam penelitian ini dilakukan penambahan jumlah *foil* dalam satu lengan turbin hingga mencapai batas maksimal maka turbin *helical cascade foil* akan mendekati bentuk turbin *savonius* karena memiliki nilai *solidity* yang sangat tinggi. Turbin *helical cascade foil* dengan nilai *solidity* yang sangat tinggi lebih memanfaatkan gaya *drag* akibat aliran yang melaluinya dibandingkan gaya *lift*. Hal ini sesuai dengan konsep turbin *savonius* yang lebih memanfaatkan gaya *drag* dibandingkan gaya *lift*. Oleh karena itu performansi turbin *helical cascade foil* tidak selalu mengalami peningkatan seiring dengan penambahan jumlah *foil* akan tetapi memiliki tingkat saturasi tertentu. Untuk mengetahui tingkat saturasi dari performansi turbin *helical cascade foil* dapat dilihat dari nilai rata-rata gaya dan torsi yang dihasilkan turbin pada kecepatan arus air 0,5-2 m/s. Hal tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 4.28 dan 4.29.





**Gambar 4.28** Pengaruh jumlah *foil* terhadap gaya yang dihasilkan turbin



**Gambar 4.29** Pengaruh jumlah *foil* terhadap torsi yang dihasilkan turbin



Nilai gaya dan torsi yang dihasilkan turbin *helical cascade foil* memiliki tingkat saturasi ketika dilakukan penambahan empat *foil* dalam satu lengan turbin. Hal tersebut menunjukkan bahwa turbin *helical cascade 4 foil* memiliki performansi yang optimal dengan menghasilkan rata-rata gaya dan torsi masing-masing sebesar 482,16 N dan 180,06 Nm. Apabila dilakukan penambahan lebih dari empat *foil* dalam satu lengan turbin maka nilai gaya dan torsi yang dihasilkan mengalami penurunan yang artinya performansi turbin juga menurun.

Karakteristik aliran yang melalui turbin berupa kontur tekanan aliran, pola kecepatan aliran, dan vektor kecepatan aliran merupakan fenomena-fenomena yang sulit diamati dalam sebuah eksperimen. Karakteristik aliran yang diperoleh dari hasil simulasi dapat digunakan untuk mengetahui distribusi tekanan dan kecepatan arus air pada masing-masing *foil* dan *shaft* turbin. Selain itu juga dapat digunakan untuk mengetahui *wake* yang tersusun dari interaksi *vortex* dalam tingkat turbulensi tertentu.

Turbin model II dan model III mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan arus air di semua *foil* pada masing-masing lengan. Oleh karena itu turbin model II dan model III yang memiliki lebih dari satu *foil* di setiap lengannya akan mendapatkan tekanan total dan kecepatan arus air total yang lebih besar dibandingkan dengan turbin model I yang hanya memiliki satu *foil* di setiap lengannya.

*Vortex* yang melalui turbin dapat menurunkan tekanan dan kecepatan arus air pada masing-masing *foil*. Meskipun *vortex* yang melalui turbin model II dan model III memiliki tingkat turbulensi lebih besar dari turbin model I, namun *vortex* tersebut hanya mempengaruhi satu *foil* saja sehingga *foil-foil* yang lain tetap mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan arus air. Maka dari itu turbin model II dan model III dapat menghasilkan gaya dan torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin model I.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi, analisis data, dan pembahasan yang telah dilakukan maka kesimpulan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Turbin model III memiliki performansi terbaik dengan menghasilkan gaya dan torsi tertinggi dibandingkan turbin model I dan model II. Turbin model III mengalami peningkatan gaya dan torsi terhadap turbin model I masing-masing sebesar 37,38-100,95% dan 43,87-111,77% pada kecepatan arus air 0,5-2 m/s.
- Turbin *helical cascade foil* memiliki performansi optimal apabila dilakukan penambahan empat *foil* dalam satu lengan turbin dengan menghasilkan rata-rata gaya dan torsi masing-masing sebesar 482,16 N dan 180,06 Nm pada kecepatan arus air 0,5-2 m/s.
- Turbin model II dan model III mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan arus air pada masing-masing *foil* sehingga tekanan total dan kecepatan arus air total yang diterima bernilai lebih besar dibandingkan dengan turbin model I.
- Turbin model II dan model III mendapatkan *vortex* dengan tingkat turbulensi lebih besar dibandingkan turbin model I. *Vortex* tersebut hanya mempengaruhi satu *foil* saja sehingga *foil-foil* yang lain tetap mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan arus air.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Turbin *helical cascade foil* dapat dikembangkan dengan melakukan analisis pengaruh jarak *foil* dalam satu lengan turbin beserta getaran yang dihasilkan.
- Desain turbin *helical cascade foil* dapat dikembangkan dalam bentuk V-*helical cascade foil* dan modifikasi *foil* turbin dalam

mekanisme *active variable pitch* maupun *passive variable pitch* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performansi turbin. Pengembangan desain tersebut dapat dilakukan dengan cara eksperimen maupun simulasi.

## LAMPIRAN IA

Nilai Gaya Resultan (N)  
Turbin *Helical* (Model I)

Azimuth	0,5 m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s
0	84,25	379,80	801,60	1.382,50
30	8,04	30,09	66,43	117,03
60	11,49	45,80	101,76	179,64
90	15,02	53,21	114,83	199,91
120	97,91	353,22	767,37	1.340,41
150	4,84	18,48	41,20	73,05
180	8,21	39,89	89,83	159,45
210	14,91	49,82	105,93	183,21
240	88,25	393,65	831,64	1.432,69
270	4,67	10,03	21,44	39,18
300	7,57	33,46	75,33	133,98
330	13,79	45,58	97,15	168,15
360	84,25	379,80	801,60	1.382,50
Rata-Rata	34,09	140,99	301,24	522,44

**LAMPIRAN IB**  
 Nilai Torsi Resultan (Nm)  
 Turbin *Helical* (Model I)

<b>Azimuth</b>	<b>0,5 m/s</b>	<b>1,0 m/s</b>	<b>1,5 m/s</b>	<b>2,0 m/s</b>
0	27,73	128,90	270,09	463,76
30	3,07	11,83	26,32	46,56
60	3,21	14,04	32,12	57,50
90	4,54	22,84	48,70	84,25
120	32,65	118,12	257,16	449,70
150	1,55	6,70	15,49	27,92
180	2,76	11,42	26,60	48,15
210	6,66	21,42	45,06	77,50
240	28,92	134,88	281,90	483,24
270	2,24	5,49	11,32	19,96
300	2,68	10,07	22,17	39,13
330	6,52	20,27	42,17	72,02
360	27,73	128,90	270,09	463,76
Rata-Rata	11,56	48,84	103,78	179,49

**LAMPIRAN IIA**  
 Nilai Gaya Resultan (N)  
 Turbin *Helical Cascade 2 Foil* (Model II)

<b>Azimuth</b>	<b>0,5 m/s</b>	<b>1,0 m/s</b>	<b>1,5 m/s</b>	<b>2,0 m/s</b>
0	110,16	526,57	1.325,13	2.479,04
30	8,66	41,08	100,74	186,19
60	8,76	40,51	94,61	171,23
90	11,65	60,62	147,54	272,47
120	100,73	502,69	1.217,60	2.244,94
150	8,31	44,32	109,51	204,07
180	9,94	43,21	102,38	185,54
210	9,07	46,11	114,86	215,67
240	110,84	535,16	1.377,91	2.610,92
270	7,26	32,43	80,97	161,26
300	8,26	34,00	82,21	150,82
330	8,25	38,69	93,35	173,27
360	110,16	526,57	1.325,13	2.479,04
Rata-Rata	39,39	190,15	474,76	887,27

## LAMPIRAN IIB

Nilai Torsi Resultan (Nm)

Turbin *Helical Cascade 2 Foil* (Model II)

Azimuth	0,5 m/s	1,0 m/s	1,5 m/s	2,0 m/s
0	37,52	174,09	450,69	854,13
30	3,35	16,40	40,38	74,81
60	3,31	14,78	35,09	64,28
90	6,65	24,31	59,88	111,16
120	35,34	173,53	421,27	778,02
150	3,26	17,45	42,76	79,37
180	3,20	16,35	39,17	71,86
210	3,73	19,64	49,88	94,63
240	37,03	177,09	464,76	889,55
270	2,70	13,58	35,88	71,95
300	2,78	13,13	34,31	65,09
330	3,38	17,28	42,49	79,26
360	37,52	174,09	450,69	854,13
Rata-Rata	13,83	65,52	166,71	314,48



**LAMPIRAN IIIA**  
 Nilai Gaya Resultan (N)  
 Turbin *Helical Cascade 3 Foil* (Model III)

<b>Azimuth</b>	<b>0,5 m/s</b>	<b>1,0 m/s</b>	<b>1,5 m/s</b>	<b>2,0 m/s</b>
0	115,49	585,24	1.421,59	2.615,30
30	13,71	57,33	133,48	242,75
60	11,75	59,14	143,56	264,62
90	28,13	135,78	323,11	589,34
120	124,20	616,44	1.489,37	2.741,87
150	13,00	65,19	160,55	297,40
180	9,95	52,31	128,23	236,73
210	20,15	95,23	226,10	412,24
240	117,42	594,59	1.459,48	2.711,94
270	10,36	60,07	149,34	275,66
300	9,34	45,65	111,75	205,61
330	19,90	101,61	241,22	439,07
360	115,49	585,24	1.421,59	2.615,30
Rata-Rata	46,84	234,91	569,95	1.049,83

### LAMPIRAN IIIB

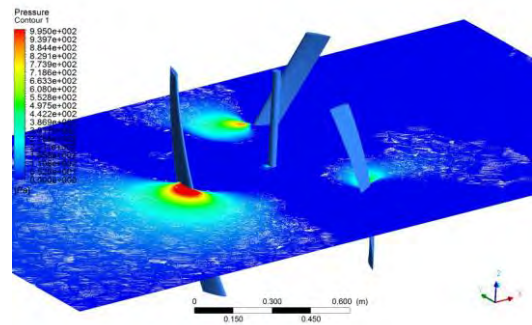
Nilai Torsi Resultan (Nm)

Turbin *Helical Cascade 3 Foil* (Model III)

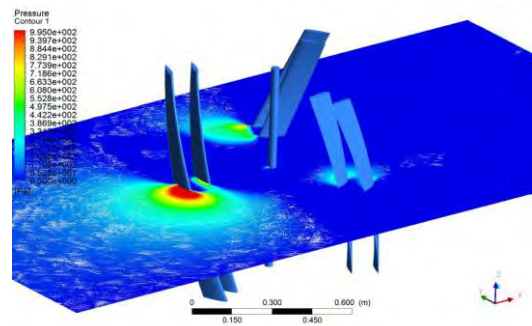
<b>Azimuth</b>	<b>0,5 m/s</b>	<b>1,0 m/s</b>	<b>1,5 m/s</b>	<b>2,0 m/s</b>
0	39,94	205,98	508,95	944,34
30	5,30	22,63	52,73	95,81
60	4,09	21,24	51,69	95,29
90	10,53	50,16	119,00	216,64
120	44,45	219,20	531,84	980,95
150	5,18	25,91	63,33	116,95
180	3,70	19,14	46,90	86,31
210	7,16	34,34	80,96	147,29
240	41,33	206,85	514,48	962,32
270	4,42	25,94	64,23	118,09
300	3,56	17,52	41,63	74,95
330	6,60	35,47	85,98	158,19
360	39,94	205,98	508,95	944,34
Rata-Rata	16,63	83,88	205,44	380,11

# LAMPIRAN IVA

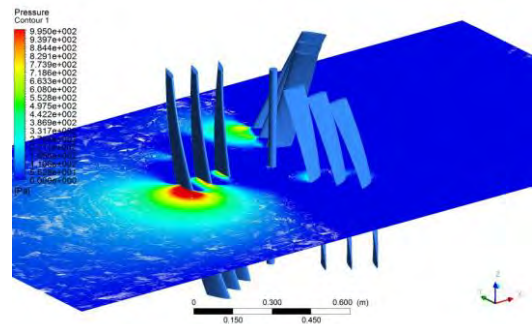
## Visualisasi 3 Dimensi Kontur Tekanan Aliran



Turbin *Helical* (Model I)



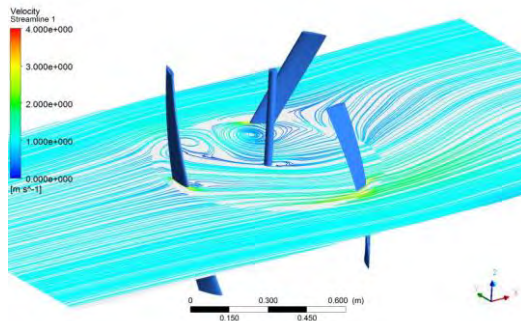
Turbin *Helical Cascade 2 Foil* (Model II)



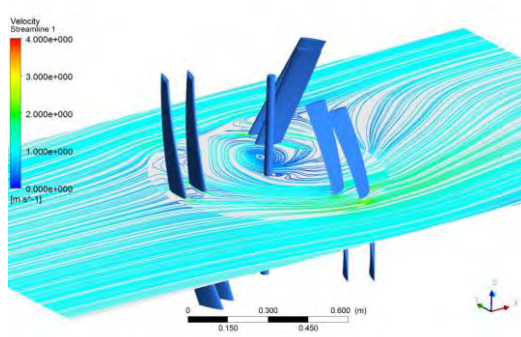
Turbin *Helical Cascade 3 Foil* (Model III)

## LAMPIRAN IVB

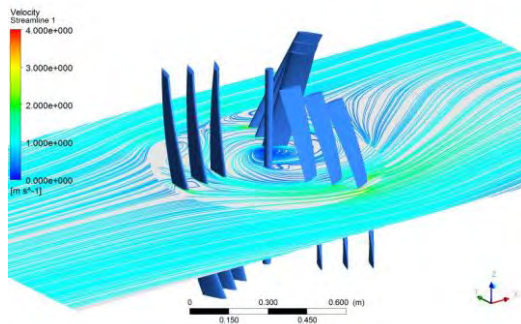
### Visualisasi 3 Dimensi Pola Kecepatan Aliran



Turbin *Helical* (Model I)



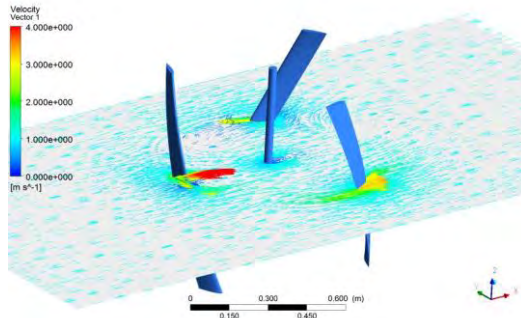
Turbin *Helical Cascade 2 Foil* (Model II)



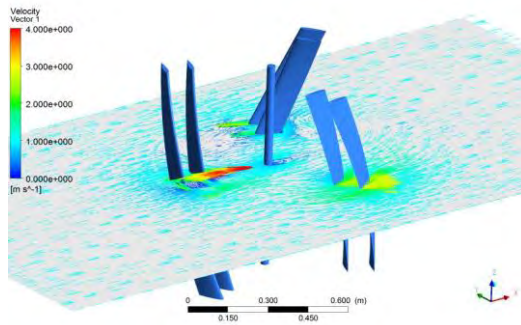
Turbin *Helical Cascade 3 Foil* (Model III)

## LAMPIRAN IVC

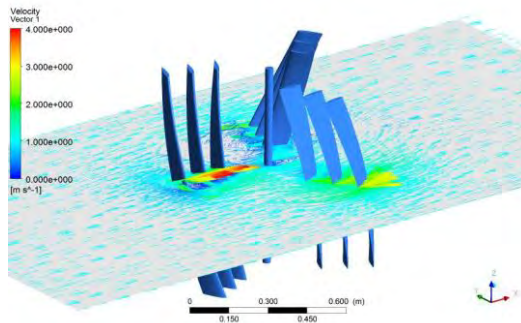
### Visualisasi 3 Dimensi Vektor Kecepatan Aliran



Turbin *Helical* (Model I)



Turbin *Helical Cascade 2 Foil* (Model II)



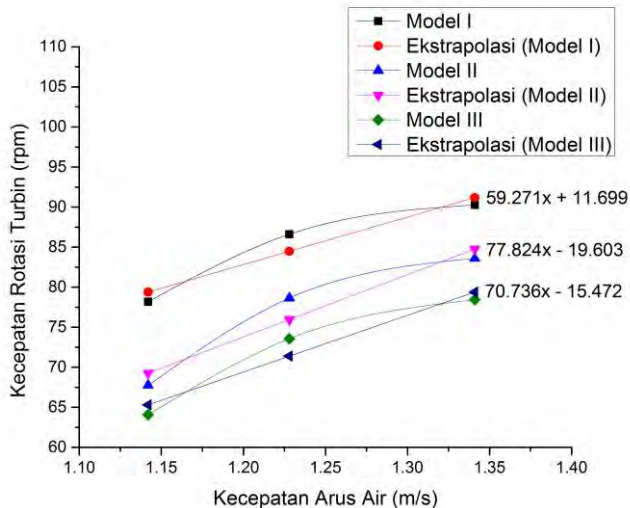
Turbin *Helical Cascade 3 Foil* (Model III)

## LAMPIRAN V

Tabel Hubungan Kecepatan Arus Air dengan Kecepatan Rotasi Turbin Berdasarkan Data Hasil Eksperimen

Variasi Turbin	Kecepatan Arus Air (m/s)	Kecepatan Rotasi Turbin (rpm)
Turbin <i>Helical</i> (Model I)	1,142	78,180
	1,228	86,607
	1,341	90,263
Turbin <i>Helical Cascade 2 Foil</i> (Model II)	1,142	67,753
	1,228	78,640
	1,341	83,603
Turbin <i>Helical Cascade 3 Foil</i> (Model III)	1,142	64,067
	1,228	73,577
	1,341	78,440

Grafik Hubungan Kecepatan Arus Air dengan Kecepatan Rotasi Turbin Berdasarkan Hasil Ekstrapolasi

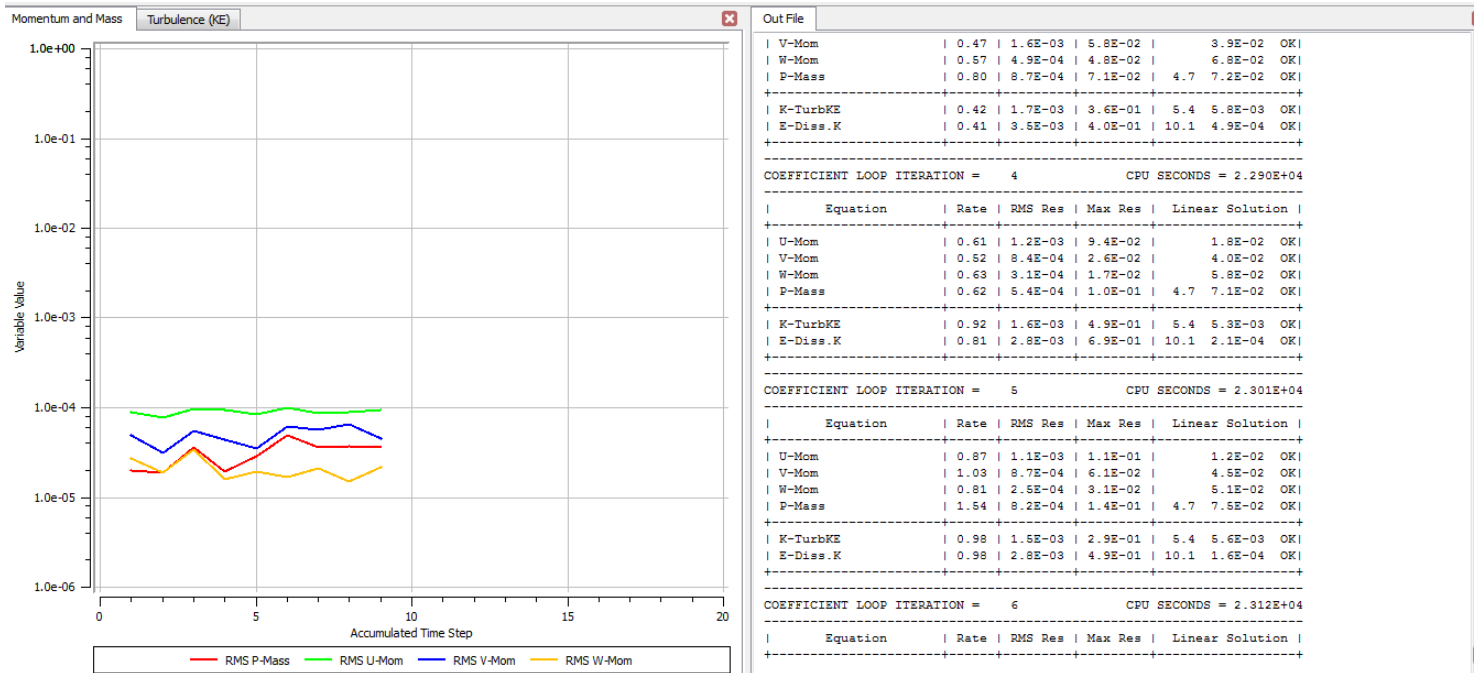


Tabel Hubungan Kecepatan Arus Air dengan Kecepatan Rotasi Turbin Pada Penelitian ini

<b>Variasi Turbin</b>	<b>Kecepatan Arus Air (m/s)</b>	<b>Kecepatan Rotasi Turbin (rpm)</b>
Turbin <i>Helical</i> (Model I)	0,5	41,333
	1,0	70,969
	1,5	100,605
	2,0	130,241
Turbin <i>Helical Cascade 2 Foil</i> (Model II)	0,5	19,310
	1,0	58,222
	1,5	97,135
	2,0	136,047
Turbin <i>Helical Cascade 3 Foil</i> (Model III)	0,5	19,894
	1,0	55,263
	1,5	90,632
	2,0	126,001

## LAMPIRAN VI

### Proses Iterasi pada Solver





## DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, John D. 1995. Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications. Singapore: McGraw-Hill Book Companies, Inc.
- Asmus, P., Wheelock, C. 2009. Hydrokinetic and Ocean Energy. USA: Pike Research LLC.
- Bartl, J. 2011. Wake Measurement Behind an Array of Two Model Wind Turbines. Master of Science Thesis, KTH Industrial Engineering and Management.
- Coiro, D. P., Marco, D., Nicolosi, F., Melone, S., Montella, F. 2005. Dynamic Behaviour of The Patented Kobold Tidal Current Turbine: Numerical and Experimental Aspects. *Acta Polytechnica*, 45(3), 77-84.
- Gorban, A. N., Gorlov, A., Silantyev, V. M. 2001. Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow. *Journal of Energy Resources Technology*, 123, 311-317.
- Gorlov, A. 1998. Development of The Helical Reaction Hydraulic Turbine. Technical Report, MIME Department of Northeast University.
- Han, S. H., Park, J. S., Park, W. S., Yi, J. H. 2013. Evaluation of Vertical Axis Turbine Characteristics for Tidal Current Power Plant Based on In Situ Experiment. *Ocean Engineering*, 65, 83-89.
- Jing, F., Sheng, Q., Zhang, L. 2014. Experimental Research on Tidal Current Vertical Axis Turbine With Variable-Pitch Blades. *Ocean Engineering*, 88, 228-241.
- Khalid, S. S., Liang, Z., Qi-hu, S., Xue., Zhang. 2013. Difference between Fixed and Variable Pitch Vertical Axis Tidal Turbine-Using CFD Analysis in CFX. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5(1), 319-325.
- Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal M. T., Quaicoe J.E. 2009. Hydrokinetic Energy Conversion Systems and Assessment of Horizontal and Vertical Axis Turbines for River and Tidal: Applications A Technology Status Review. *Applied Energy*, 86, 1823-1835.

- Kurniawan, I. 2014. Kajian Eksperimental dan Numerikal Turbin Air Helikal Gorlov Untuk Twist Angle 60° dan 120°. *Jurnal Teknobiologi*, 1, 7-13.
- Li, Y., Calisal S. M. 2010. Three-Dimensional Effects and Arm Effects on Modeling a Vertical Axis Tidal Current Turbine. *Renewable Energy*, 35, 2325-2334.
- Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., Thomas, G. 2015. Numerical Investigation of The Influence of Blade Helicity on The Performance Characteristics of Vertical Axis Tidal Turbines. *Renewable Energy*, 81, 926-935.
- Munson, B. R., Young D. F., Okiishi T. H. 2002. *Fundamental of Fluids Mechanic* 2nd edition. Canada: John Wiley & son, Inc.
- Petri, L. A., Sartori, P., Rogenski, J. K., De Souza, L. F. 2015. Verification and Validation of a Direct Numerical Simulation Code. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 291, 266-279.
- Samaraweera, K. K. M. N. P., Pathirathna, K. A. B., De Silva, H. E. D., Sugathapala A. G. T. 2010. Development of Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine for Stand-Alone Applications. *International Conference on Sustainable Built Environment*, 421-430.
- Sanderse, B. 2009. *Aerodynamics of Wind Turbine Wakes*. Energy Research Center of The Netherlands.
- Sarma, N. K., Biswas, A., Misra, R. D. 2014. Experimental and Computational Evaluation of Savonius Hydrokinetic Turbine for Low Velocity Condition with Comparison to Savonius Wind Turbine at The Same Input Power. *Energy Conversion and Management*, 83, 88-98.
- Sunu, P. W. 2008. Dinamika Pusat Rotasi Fluida pada Proses Difusi Penggabungan Vorteks. *Jurnal Teknik Mesin*, 10, 28-34
- Tsai, J. S., Chen, F. 2014. The Conceptual Design of a Tidal Power Plant in Taiwan. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2, 506-533.
- Tuakia, F. 2008. *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*. Bandung: Informatika Bandung.

- Twidell, J., Weir, T. 2006. Renewable Energy Resource 2nd edition. London and New York: Taylor & Francis.
- Wright, C. R., Hansen, M. C. 2011. Optimization of Helical Turbine in Low Head Applications. Master of Science Thesis, Mechanical Engineering of The University of Utah.
- Zobaa A. F., Bansal R. C. 2011. Handbook of Renewable Energy Technology. USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir pada tanggal 14 Agustus 1994 di Sidoarjo, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan di MINU Pucang Sidoarjo (2000-2006), SMPN 3 Sidoarjo (2006-2009), dan SMAN 1 Sidoarjo (2009-2012). Penulis melanjutkan studinya di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis adalah rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam kegiatan akademik sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Pengalaman *internship* penulis adalah melakukan evaluasi performa *furnace* 011F101A/B pada *fuel oil complex* II di PT. Pertamina RU IV Cilacap. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik [zainamarta@gmail.com](mailto:zainamarta@gmail.com).